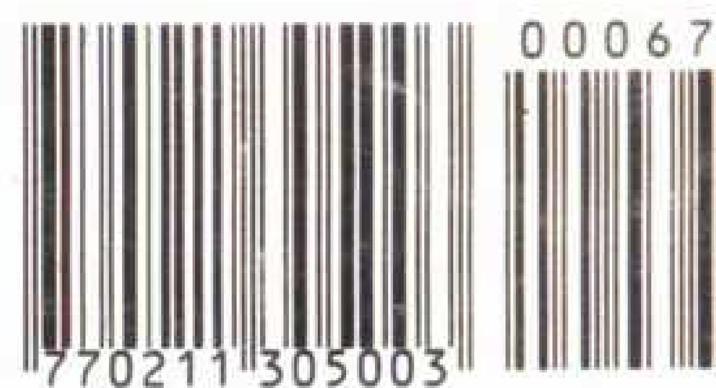
MUNDO CIENTIFICO

1981-1987
6.º ANIVERSARIO

LA RECHERCHE, *versión en castellano*

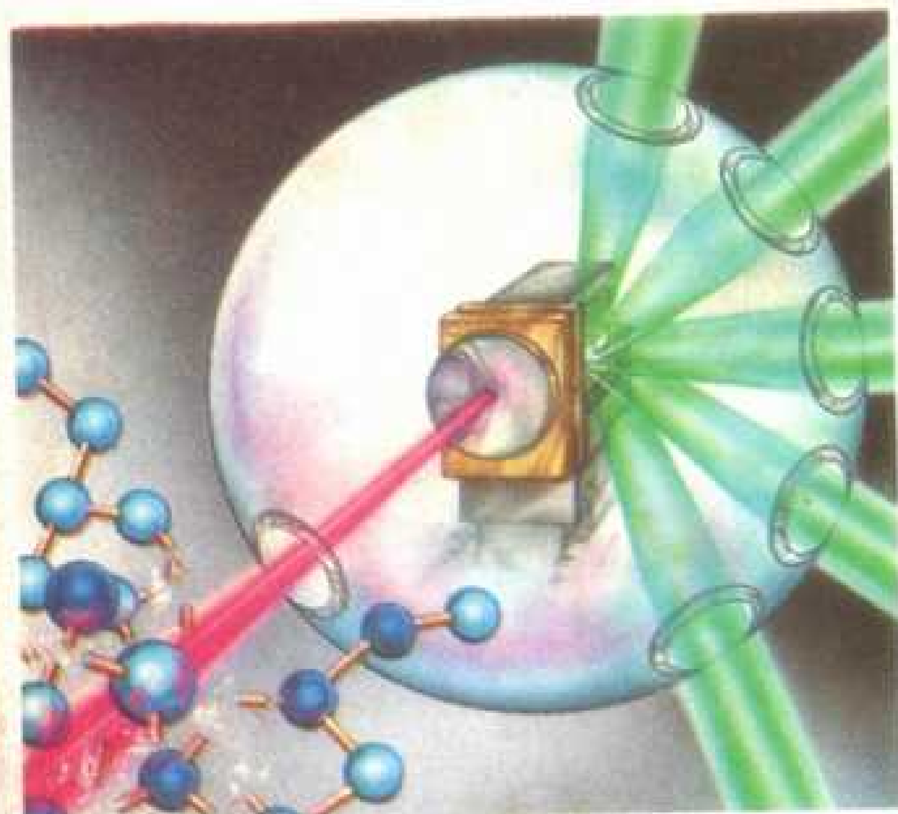
N.º 67 – MENSUAL 400 Ptas.

El desarrollo del cerebro
Análisis automático de la escritura
¿Las matemáticas conducen a Dios?
El origen de la Luna • LASER de rayos X



ISSN 0211 - 3058


MUNDO CIENTIFICO
MUNDO CIENTIFICO
MUNDO CIENTIFICO



Romper las moléculas, una de las eventuales aplicaciones del láser X. Dibujo de Fernando Acunha.) (p. 224)



La liebre recurre a una estrategia del grupo para vigilar los predadores. (p. 236)



Una colisión de extrema violencia sería el origen de la formación de la Luna. (p. 284)



¿Cómo se establece este cerebro que, en el joven embrión humano, ya ocupa un volumen ...n importante? (... Wolfe.) (...56)



¿Estarán los aviones del mañana equipados con hélices de más de 3 metros de diámetro girando a velocidades supersónicas? (Foto General Electric.) (p. 332)

MUNDO CIENTIFICO

LA RECHERCHE, *versión en castellano*

Sumario n.º 67

Páginas 236 y 237 con publicidad

El comportamiento de



por Jean-Pierre Desportes,

La gacela, la liebre, el pato... por un lado; el guepardo, el buitre, la zorra... por el otro: la mayoría de los animales son presas potenciales de otros animales. ¿Cómo escapar de un predador? Ante todo previendo su llegada, vigilando el entorno. Pero si el individuo está obligado a una vigilancia permanente del espacio que le rodea, difícilmente podrá buscar simultáneamente su propio alimento. Para

vigilancia en los animales



Figura 1. Comer o ser comido; éste es el dilema al que se enfrenta en cada momento un animal. ¿Cómo vigilar a los posibles predadores y buscar al mismo tiempo la comida? Para el perro de las praderas, un roedor norteamericano, la estrategia adoptada es la de una vigilancia en grupo. Como varios pares de ojos valen más que uno solo, se puede aumentar la vigilancia colectiva disminuyendo la individual. (Foto Jacana.)

Neil Metcalfe y Pat Monaghan

conciliar dos actividades tan vitales hay numerosas estrategias. Por ejemplo, algunas especies adoptan la vigilancia colectiva, otras cumplen turnos de guardia. El estudio del comportamiento de vigilancia pone de manifiesto que los animales despliegan numerosas muestras de ingenio para enfrentarse a un cruel dilema: comer y ser comido, o morir de hambre para no ser devorado.

La vigilancia en grupo supone una «confianza» entre individuos.

En el reino animal, casi todas las especies son una fuente potencial de alimento para otras. Pero no todas las presas son inevitablemente capturadas, ni todos los predadores tienen éxito en cada intento de caza. En esta lucha a muerte mantenida entre predadores y presas, los predadores que tienen las estrategias de caza más eficaces sobreviven mejor, y las presas mejor armadas para defenderse tienen más posibilidades de permanecer.

Las presas disponen de un vasto arsenal de medios para reducir el riesgo de ser capturadas (y comidas). Para algunas especies, las adaptaciones morfológicas son las que constituyen la mejor defensa: púas, un duro caparazón, un olor repulsivo, un gusto desagradable o incluso el camuflaje. Otras especies no tienen este tipo de defensa y despliegan diversos comportamientos para luchar contra sus predadores: las llamadas de alarma en numerosos pájaros, el hostigamiento a los predadores en las golondrinas, los brincos que efectúan algunas gacelas para detectar a los guepardos, etc. Como las gacelas, muchos animales confían de su capacidad de detección de los predadores para escapar de ellos enseguida. La detección de los predadores mediante la exploración visual del entorno es una actividad de la mayor importancia para su supervivencia: cuanto antes detecte la presa a un predador, más eficaz será el comportamiento que acabe empleando para evitar su ataque (fig. 1). Si la vigilancia del entorno es una actividad vital para los animales, también puede ser peligrosa: la detección de los predadores y la búsqueda de alimento en el suelo (por ejemplo, picotear o pacer) en general son incompatibles (fig. 2). Un animal no puede buscar alimento (con la cabeza a ras del suelo) al mismo tiempo que inspeccionar el entorno (cabeza alta) para detectar la posible presencia de predadores. A esta imposibilidad se le añade el hecho de que la capacidad de los organismos para tratar simultáneamente distintas fuentes de información concurrente (en este caso la referente a los predadores y a la comida) es limitada. Al enfrentarse a estas limitaciones, los animales tienen que conseguir un sutil equilibrio entre el tiempo que dedican a la detección de sus predadores y el que invierten buscando alimento. Entre morir de hambre (por exceso de vigilancia) y morir de «muerte violenta» (por falta de vigilancia), se presenta un cruel dilema.

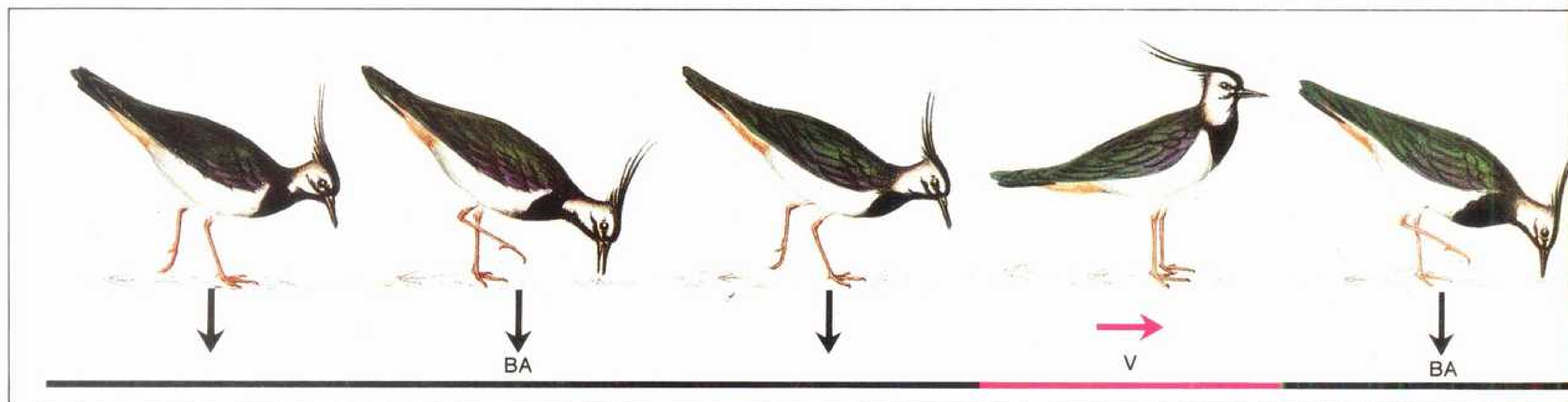
Vigilar en grupo

Desde un punto de vista formal, este dilema puede ser resuelto fácilmente mediante modelos matemáticos del comportamiento de vigilancia. Según los trabajos de dos investigadores ingleses de la universidad de Nottingham, D. Thompson y D. Lendrem, los ataques de los predadores cuando las presas no vigilan pueden ser detectados sólo con que el intervalo entre dos acciones de vigilancia sea inferior a la duración necesaria para el ataque de un predador.[1] Los datos recogidos en los avestruces, gorriones y herrerillos, por distintos equipos, han permitido elaborar un modelo.[2,3,4,5] Según este modelo, la mejor estrategia para detectar a un predador consiste, de hecho, en que las presas exploren su entorno a intervalos de tiempo irregulares. Desgraciadamente, este modelo «simple» presenta un gran inconveniente: el encadenamiento de los intervalos que separan las acciones de vigilancia no son forzosamente imprevisibles para un predador. Incluso pueden llegar a ser totalmente previsibles, ya que se trata de una acción repetitiva y entonces bastaría con que el predador esperase su «momento oportuno», (es decir un intervalo largo) para atacar a su presa (fig. 3).

Para establecer un compromiso entre el tiempo dedicado a la detección de los predadores y el transcurrido durante la búsqueda de alimento, los animales también pueden recurrir a una estrategia de grupo más allá de las estrategias individuales. A condición de que los animales en grupo vigilen el entorno independientemente unos de otros, cuanto mayor es el número de individuos que componen aquél, más posibilidades hay de que al menos un individuo se encuentre vigilando en un momento dado. En resumen, varios pares de ojos valen más que uno solo: de esta manera, el tiempo empleado por cada individuo en vigilar disminuye y los animales están tanto menos obligados a interrumpir su búsqueda de comida cuanto mayor sea el efectivo del grupo. La estrategia del grupo presupone, evidentemente, que cada individuo asume su justa parte en la vigilancia del entorno. Sólo con esta condición, la vigilancia colectiva aumenta mientras que la individual disminuye.

Por seductores que sean, no son los modelos matemáticos los que resuelven en la «naturaleza» el dilema al que se enfrentan los animales: falta de alimento o servir de alimento. Son los propios animales los que aportan sus propias soluciones, y no son necesariamente perfectos calculadores. Como los comportamientos de vigilancia del entorno son fácilmente observables en numerosas especies en forma de barridos visuales, es relativamente fácil realizar observaciones para determinar cómo suceden efectivamente las cosas sobre el terreno. Sin embargo, esta facilidad es relativa ya que la realización de observaciones rigurosamente controladas (durante dos horas y en toda clase de tiempo) no siempre es gratificante para los investigadores de etología. Por suerte estas observaciones controladas son ricas en enseñanzas sobre el significado del comportamiento de vigilancia y de los distintos parámetros a los que se ajusta.

En lo que se refiere a las estrategias de vigilancia, las investigaciones confirman globalmente las predicciones del modelo de vigilancia en grupo que brevemente hemos expuesto anteriormente. A lo largo de un estudio del comportamiento de las liebres pardas salvajes, dos de nosotros. P. Monaghan y N. Metcalfe, registraron la proporción del tiempo empleado por los animales en la vigilancia mientras se alimentaban solos o en grupo de una docena de individuos como máximo.[6] Cuando el número de liebres aumenta, disminuye el tiempo dedicado por cada individuo a la vigilancia, y la vigilancia colectiva (es decir, la proporción del tiempo por minuto durante el cual al menos una liebre vigila) aumenta (fig. 4). Este resultado es debido al hecho de que los animales en grupo exploran por barrido visual su entorno con una frecuencia superior a la de los animales que buscan su



Jean-Pierre Desportes es investigador del Centro Nacional de la Investigación Científica (CNRS) en el laboratorio de psicología social (en convenio con la universidad París 7) y efectúa investigaciones sobre comportamientos sociales, animales o humanos. **Neil B. Metcalfe** es investigador del departamento de zoología de la universidad de Glasgow, Escocia. Ha estudiado el comportamiento de vigilancia de aves y mamíferos, y actualmente trabaja sobre el comportamiento antipredador de los salmones. **Pat Monaghan** es responsable de curso en la universidad de Glasgow. Sus investigaciones se centran en el comportamiento social, las interacciones competitivas y la dominancia en las aves y los mamíferos.

alimento en solitario. Por tanto, la búsqueda de alimento en grupo es muy ventajosa, ya que cuando el efectivo del grupo aumenta, la vigilancia colectiva mejora, mientras que la vigilancia individual disminuye. Esta estrategia de vigilancia en grupo está ampliamente extendida en el mundo animal. Éste es el caso, por ejemplo, de los tejedores de pico rojo sometidos a la predación de un azor (ave de presa) y de los perros de las praderas de los parques naturales de Wisconsin y Colorado, estudiados respectivamente por J. Lazarus, de la universidad de Newscastle, y por J.L. Hoogland, de la universidad de Michigan.[7,8]

No vale hacer trampas

Como ya hemos subrayado, esta estrategia solamente alcanza toda su eficacia colectiva, los individuos tienen interés en aumentar cada uno la frecuencia de sus exploraciones. Los individuos que intentan «engañar» a los demás aumentan su propio riesgo de ser víctima de un predador. El individuo del grupo que detecta primero el acecho de un enemigo mortal tiene grandes posibilidades de escapar de él: el que «engañe» a los otros tiene pocas posibilidades de ser el primero. En resumidas cuentas, «hacer trampas» no aporta ventajas».

Esta estrategia colectiva impone una cierta «confianza» entre los miembros de un grupo. El problema de la «confianza recíproca» se plantea con toda su crudeza entre los animales que buscan su comida en grupos compuestos de individuos de especies distintas. ¿Pueden fiarse a los miembros de otras especies para advertir la presencia de un predador? Se trata de un problema delicado, ya que los predadores no son los mismos para las distintas especies del grupo: un halcón ataca preferentemente a los pájaros pequeños. Estudiando grupos de pájaros compuestos de vuelvepiedras y correlimos oscuros, dos especies de zancudas que hibernan en las costas de Escocia, N. Metcalfe se percató de que las aves más pequeñas ajustaban su comportamiento de vigilancia al número de aves de la misma talla en el grupo.[10] Cuando sólo estaban cerca de aves mayores que ellas, las de menor talla se comportaban como si estuvieran solas.

En algunas especies los animales hacen turnos de guardia

Una solución adoptada por algunos animales es asegurar turnos de guardia: uno de los miembros del grupo vigila cia si cada miembro de un grupo contribuye a la vigilancia de los predadores manteniéndose alerta. Para ser totalmente antropomórficos digamos que los animales tienen que «confiar» plenamente unos en otros. Pero ¿por qué «hacer trampas» (por ejemplo, reunirse con un grupo y vigilar menos que los otros miembros) no sirve? Intuitivamente un animal que se comportara así debería ganar tiempo, que podría dedicar a la búsqueda de alimento. Este problema ha sido analizado por el equipo norteamericano de T. Caraco, que calculó el riesgo de predación en el que incurrirían unas aves picoteando en grupo, en función de las distintas estrategias de vigilancia que adoptaran.[9] Los resultados indican que la mejor estrategia es mirar lo que hacen los demás miembros del grupo y ajustar su propio comportamiento de vigilancia al de los otros.

Así, si un ave se da cuenta de que su vecino tiene una frecuencia de vigilancia comparable a la de un ave solitaria –frecuencia que, por tanto, no aumenta la vigilancia colectiva– también reducirá su propia frecuencia de exploración del entorno. Progresivamente, por contagio, todos los miembros del grupo van a hacer lo mismo. El conjunto de los individuos, incluido el «tramposo» perderán el beneficio de estar en grupo. Por tanto, para aumentar la vigilancia

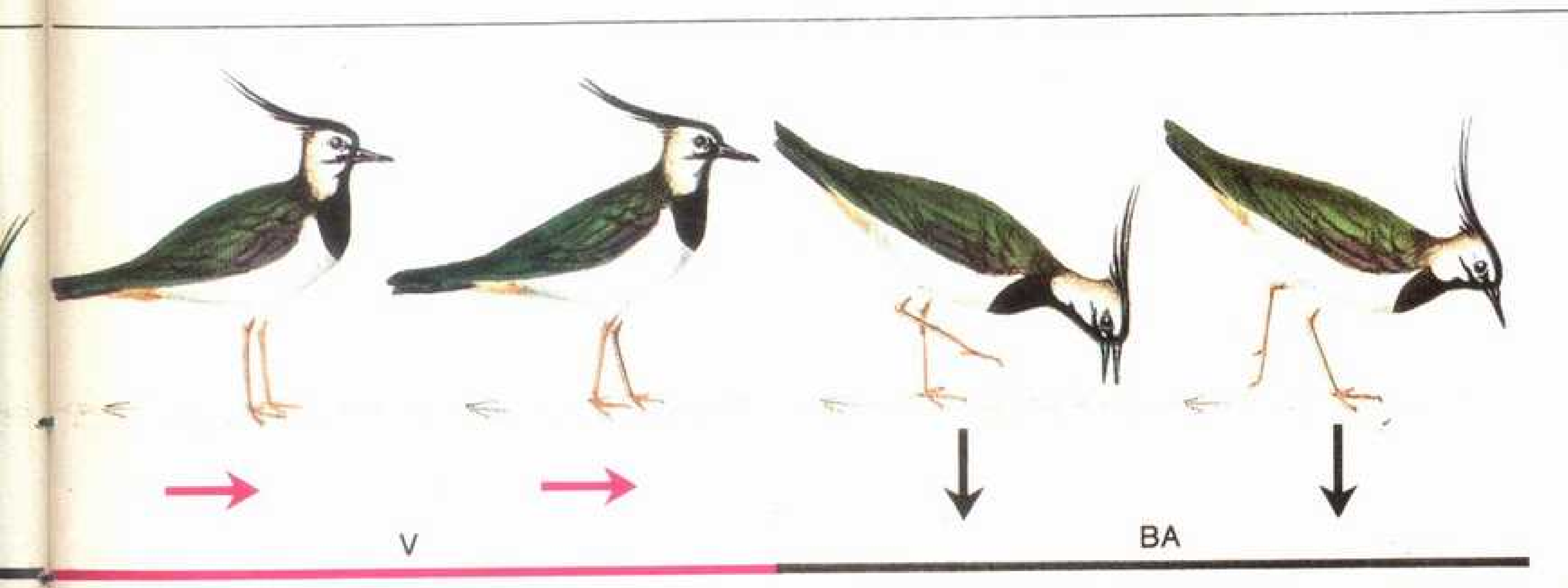


Figura 2. El avefría no puede tener al mismo tiempo la cabeza dirigida hacia el suelo para picotear y levantada para investigar el entorno. Ambas actividades son incompatibles, hay que escoger. La secuencia representada muestra la alternancia entre la búsqueda de alimento (BA) y la vigilancia (V). Este tipo de secuencia de la figura de la izquierda permite calcular los principales valores utilizados en el análisis del comportamiento de vigilancia: la proporción del tiempo dedicado por minuto a la vigilancia, la frecuencia de los períodos de vigilancia, la duración media de estos períodos y la duración media del intervalo entre dos períodos de vigilancia. A partir de aquí, los investigadores intentan comprender cómo el animal consigue un equilibrio sutil entre dedicar tiempo a alimentarse evitando, al mismo tiempo, a los predadores.

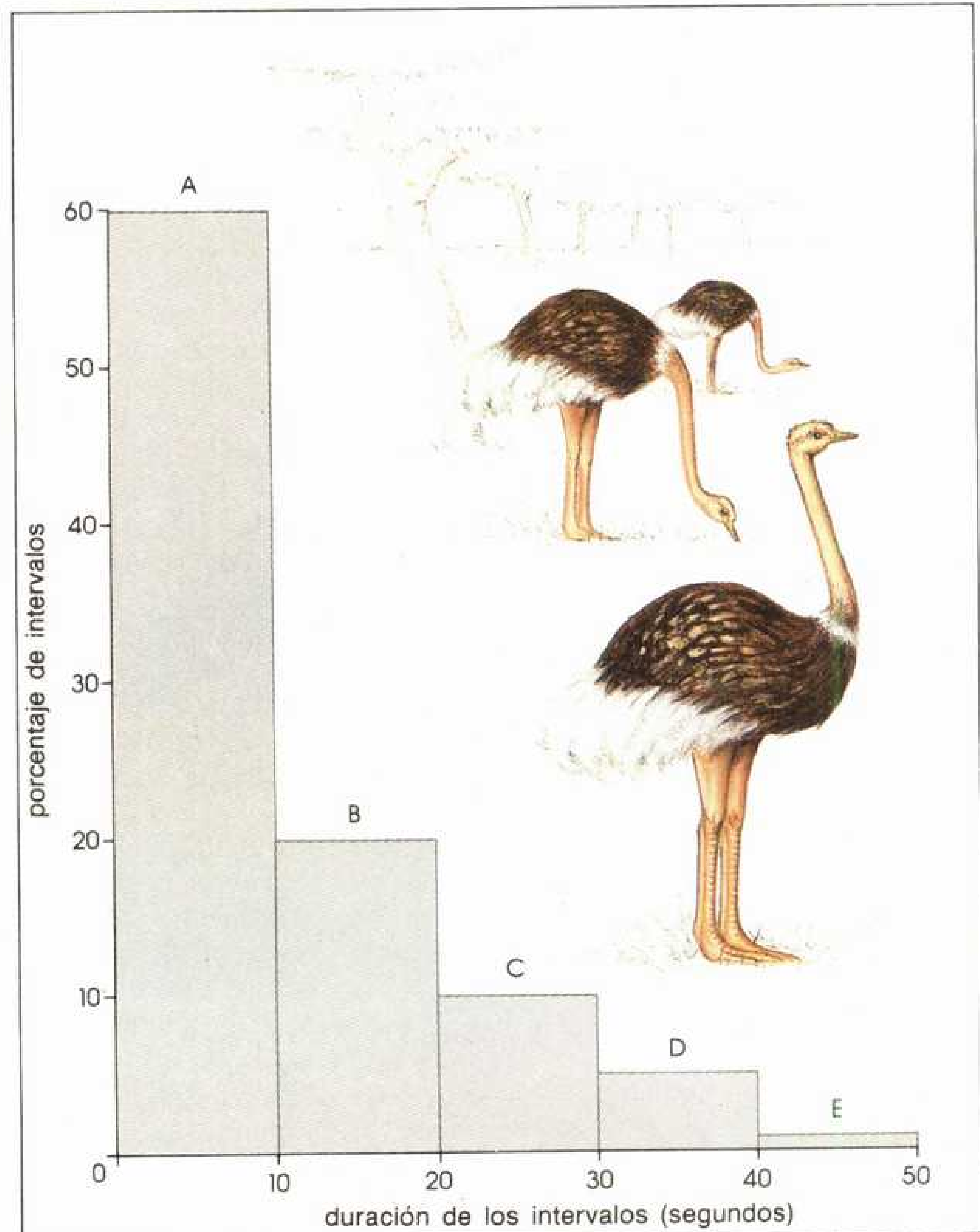


Figura 3. Las observaciones efectuadas entre las avestruces muestran que los intervalos entre dos períodos de vigilancia, consistentes en levantar la cabeza para detectar la presencia de predadores, son irregulares (distribuidos según la ley exponencial negativa). Contrariamente a lo que han afirmado numerosos autores, esta distribución no prueba que los animales exploren su entorno de forma aleatoria o imprevisible. De hecho, el encadenamiento de los intervalos puede ser totalmente previsible, con una distribución de sus porcentajes ajustada totalmente a la ley exponencial negativa: por ejemplo, se podría repetir sistemáticamente la secuencia A-A-A-A-A-A-B-B-C-D.[2]

(1) D.B.A. Thompson, D.W. Lendrem, *Anim. Behav., 33,* 1318, 1985.
(2) B.C.R. Bertram, *Anim. Behav., 28,* 278, 1980.
(3) M.A. Elgar, C.P. Caterall, *Anim. Behav., 29,* 868, 1981.
(4) P. Elcavage, T. Caraco, *Anim. Behav., 31,* 303, 1983.
(5) D.W. Lendrem, *Behav. Ecol. Sociobiol., 14,* 9, 1983.
(6) P. Monaghan, N. Metcalfe, *Anim. Behav., 33,* 993, 1985.
(7) J. Lazarus, *Anim. Behav., 27,* 855, 1979.
(8) J.L. Hoogland, *Anim. Behav., 27,* 394, 1979.
(9) R. Pulliam y col., *J. Theor. Biol., 95,*89, 1982.
(10) N.B. Metcalfe, *Anim. Behav., 32,* 986, 1984.

algunas especies efectúan turnos de guardia.

mientras los demás buscan su comida. Estos últimos pueden alimentarse tranquilamente ya que no tienen que vigilar para detectar a posibles predadores. La existencia de centinelas presupone que se trata de grupos relativamente estables: un centinela no puede alimentarse mientras monta guardia y, por tanto, solamente puede obtener la contrapartida de su comportamiento si los demás miembros del grupo aseguran el relevo por turnos. Éste es el caso del crateropo de la selva, una especie de pájaro que vive en pequeños grupos de una veintena de individuos estables a lo largo de todo el año. Todos los miembros de un grupo hacen de centinela por turnos: un centinela monta guardia sobre las ramas bajas de un árbol durante varios minutos, encima del grupo que picotea en el

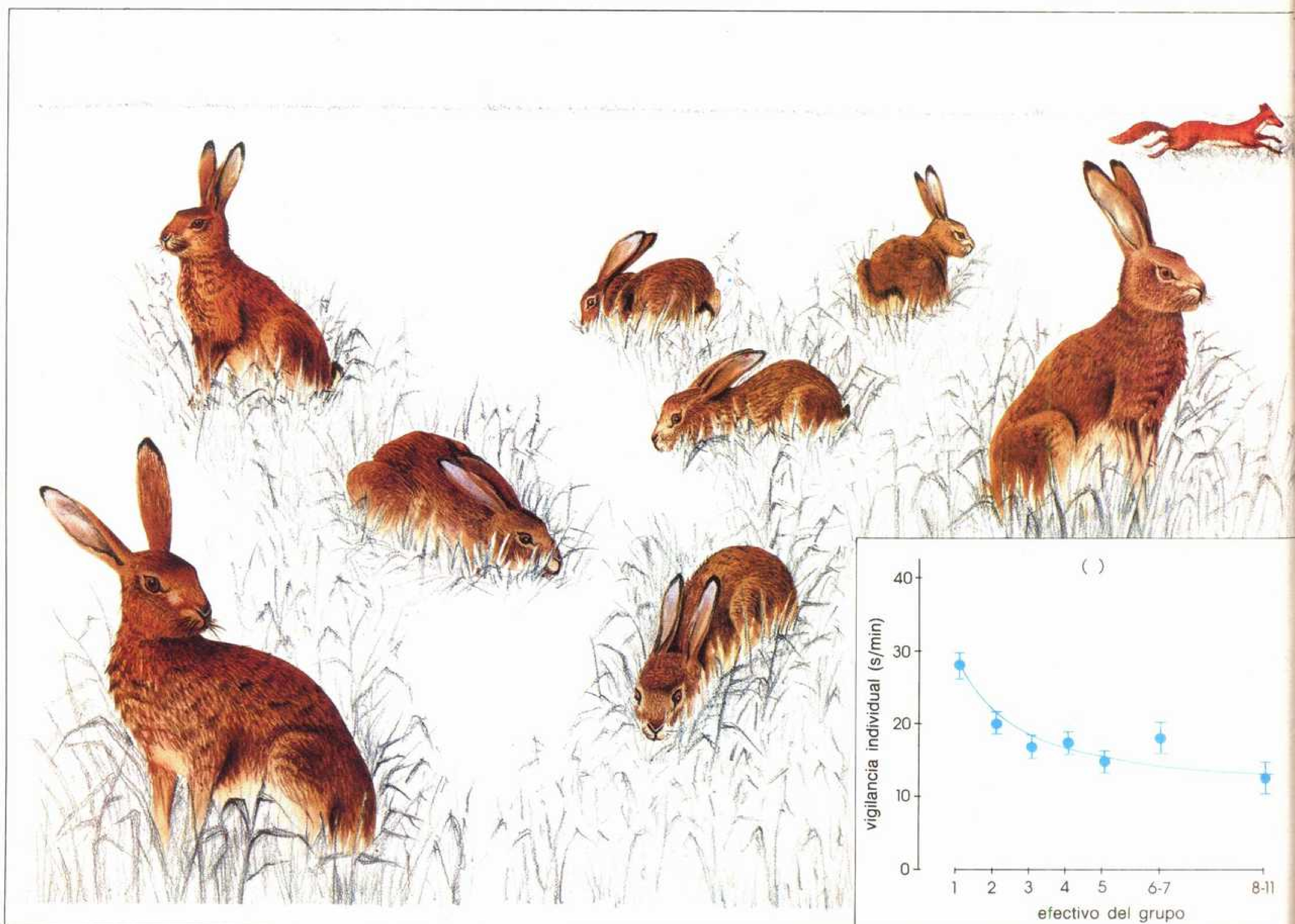
Figura 4. Como el perro de las praderas (fig. 1), la liebre parda recurre a una estrategia de grupo para vigilar a los predadores mientras se alimenta. El estudio de su coportamiento de vigilancia muestra que los animales pasan menos tiempo en detectar a los predadores cuando el número de individuos del grupo aumenta (A). Pero la vigilancia colectiva (es decir, la proporción de tiempo por minuto durante la cual al menos una liebre vigila) crece con el efectivo del grupo (B).
Por tanto, la búsqueda de alimento en grupo es ventajosa desde el punto de vista de la detección de los predadores.[6]

suelo. A. Gaston, de la universidad de Oxford (Gran Bretaña), demostró que la proporción del tiempo pasado montando guardia aumentaba con la posición jerárquica del individuo dentro del grupo.[11] Se supone que los pájaros «dominantes», de más edad y más experimentados en la búsqueda de comida, pueden dedicar más tiempo a la vigilancia que los demás. Los trabajos efectuados en 1985 por R. Hegner, de la universidad de Oxford, sobre el herrerillo común apoyaron esta hipótesis: los pájaros dominantes vigilan más que los dominados; los dominantes emplean mejor los recursos alimentarios y, por tanto, no tienen que estar tanto tiempo buscando comida (ya que su motivación respecto a ésta disminuye) y de esta manera pueden disponer de más tiempo para vigilar el entorno.[12]

Cuando los padres tienen que cuidar a sus pequeños, el reparto del tiempo dedicado a la vigilancia no es el mismo según los sexos. Así, J. Lazarus y I. Inglis pusieron de manifiesto en 1978 que en las parejas de gansos con pequeños, los machos dedican el 20 % de su tiempo a la vigilancia, mientras que las hembras solamente consagran el 5 % a esta actividad.[13] Las hembras realizan solas toda la incubación de los huevos y se encuentran en mala condición física después de la eclosión. Entonces tienen que alimentarse mucho más que los machos para recuperarse. Éstos compensan la pérdida de tiempo dedicado a la vigilancia picoteando más rápidamente. No se observa ninguna de estas diferencias en las parejas de gansos sin progenie (que, por supuesto, vigilan mucho menos que las parejas con hijos).

Se vigila menos en el centro que en la periferia

La dificultad con la que se enfrenta un animal en la búsqueda de su alimento también es un parámetro que determina el tiempo empleado en la vigilancia del entorno. El británico S. Lawrence, de la universidad de Southampton, ha demostrado recientemente que los mirlos que buscan presas muy visibles dedican casi dos veces más de tiempo a la vigilancia que los que buscan presas cuyo color se confunde con el del suelo (y, por tanto, son poco visibles).[14] Los mirlos que buscan presas camufladas tienen que dedicar más tiempo a la búsqueda de alimento y ello en detrimento de la vigilancia. Los animales, por supuesto, tienen la posibilidad de seleccionar tipos de alimento que re-



(11) A. Gaston, *Anim. Behav., 25* 828, 1977.
(12) R.E. Hegner, *Anim. Behav., 33,* 762, 1985.
(13) J. Lazarus, I. Inglis, *Behaviour, 65,* 62, 1978.
(14) S. Lawrence, *Anim. Behav., 33,* 1373, 1985.

quieran menos atención visual o de cambiar su modo de alimentación de manera que pueda dedicar más tiempo a la detección de los predadores. Esto es lo que hace el pez espinoso, como pusieron de manifiesto las investigaciones iniciadas en 1979 por M. Milinski, de la universidad del Rhur (Alemania). Normalmente, los espinosos buscan sus presas (pequeños crustáceos denominados dafnias) donde son más numerosas, para maximizar la captura de alimento;[15] pero en presencia de un señuelo que mimetiza un predador cambian el método de alimentación: pasan a preferir lugares en los que las dafnias son escasas, pero donde puedan detectar mejor a los predadores.[16] En las palomas D. Lendrem, de Oxford, ha demostrado que los animales cambian de método de alimentación cuando se impone la vigilancia del entorno: en presencia de un predador las palomas picotean menos frecuentemente, pero durante más tiempo cada vez.[17]

El tiempo que un animal pasa vigilando es resultado de un compromiso entre dos exigencias rivales: la necesidad de alimento, por una parte, y la necesidad de evitar la predación, por otra. En resumen, el tiempo dedicado a los distintos comportamientos (entre ellos la vigilancia) es flexible, ya que el animal se adapta a las modificaciones de su entorno. En especial, si el riesgo de ser capturado aumenta, los animales pasan más tiempo vigilando y menos buscando alimento. Entre las numerosas investigaciones dedicadas a este ajuste del comportamiento frente al riesgo, una de las más ilustrativas es la de T. Caraco sobre el junco de ojos amarillos.[18] Este pajarito de Norteamérica se alimenta habitualmente en el suelo, en grupos que viven en zonas boscosas. Si detecta a un predador (un halcón, por ejemplo), levanta el vuelo rápidamente hacia el árbol o el arbusto más cercano para ponerse a cubierto. Según un comportamiento clásico, observado por el norteamericano K. Sullivan en los picos, los pájaros están más alerta justo antes de alzar el vuelo,[19] y como ha demostrado T. Caraco, ajustan su comportamiento de vigilancia a la distancia que tienen que recorrer para ponerse a salvo: cuanto más lejos se encuentran de un árbol o de un arbusto, más vigilan antes de huir. Los juncos también adaptan este comportamiento a la abundancia de predadores: esto es lo que ha observado el grupo de T. Caraco empleando halcones adiestrados.[20]

El tiempo dedicado a la vigilancia y a la búsqueda de comida no está determinado solamente por el riesgo a la predación. También varía con la cantidad de alimento que necesita el animal. Cuanto mayor es esta necesidad, más se dedica a la búsqueda de alimento, con el riesgo de exponerse a sus predadores. Este caso queda perfectamente ilustrado por las aves migratorias durante el período que precede a su partida. Las largas migraciones son tan costosas energéticamente, que las aves tienen que acumular importantes reservas de grasa (hasta el 30 % de su peso normal) para afrontar el viaje. Solamente pueden crear estas reservas dedicando menos tiempo a la vigilancia. El estudio realizado por N. Metcalfe y R. Furness en los vuelvepiedras, que pueden migrar de Escocia a Groenlandia y Canadá, o sea un trayecto de 3500 km aproximadamente, lo demuestra perfectamente: las aves que se preparan para migrar reducen su comportamiento de vigilancia durante las tres semanas que preceden su salida: por el contrario, las aves que no migran tienen un comportamiento de vigilancia totalmente normal.[21]

La técnica de caza de los predadores también provoca un ajuste del comportamiento de vigilancia de las presas. La mayoría de los predadores atacan a los animales de la periferia del grupo: bien atacan directamente a un individuo, bien intentan separarlo del resto del grupo. Estas tácticas son utilizadas por los peces, los halcones y los gatos, por ejemplo. Sea cuál sea la táctica seguida, los animales periféricos están más expuestos a los predadores que los que están en el centro del grupo. También son los que más vigilan: así, los estorninos pintos que buscan su comida en la periferia de un grupo vigilan más que los que se encuentran en el centro[22] (fig. 5). Este resultado se encuentra de forma idéntica en animales muy alejados de los estorninos en el reino animal: J. Robinson, del Departamento de investigación zoológica de la Smithsonian Institution en Washington, observó que los capuchinos, primates de las selvas de Venezuela, vigilan más en la periferia que en el centro del grupo.[23]

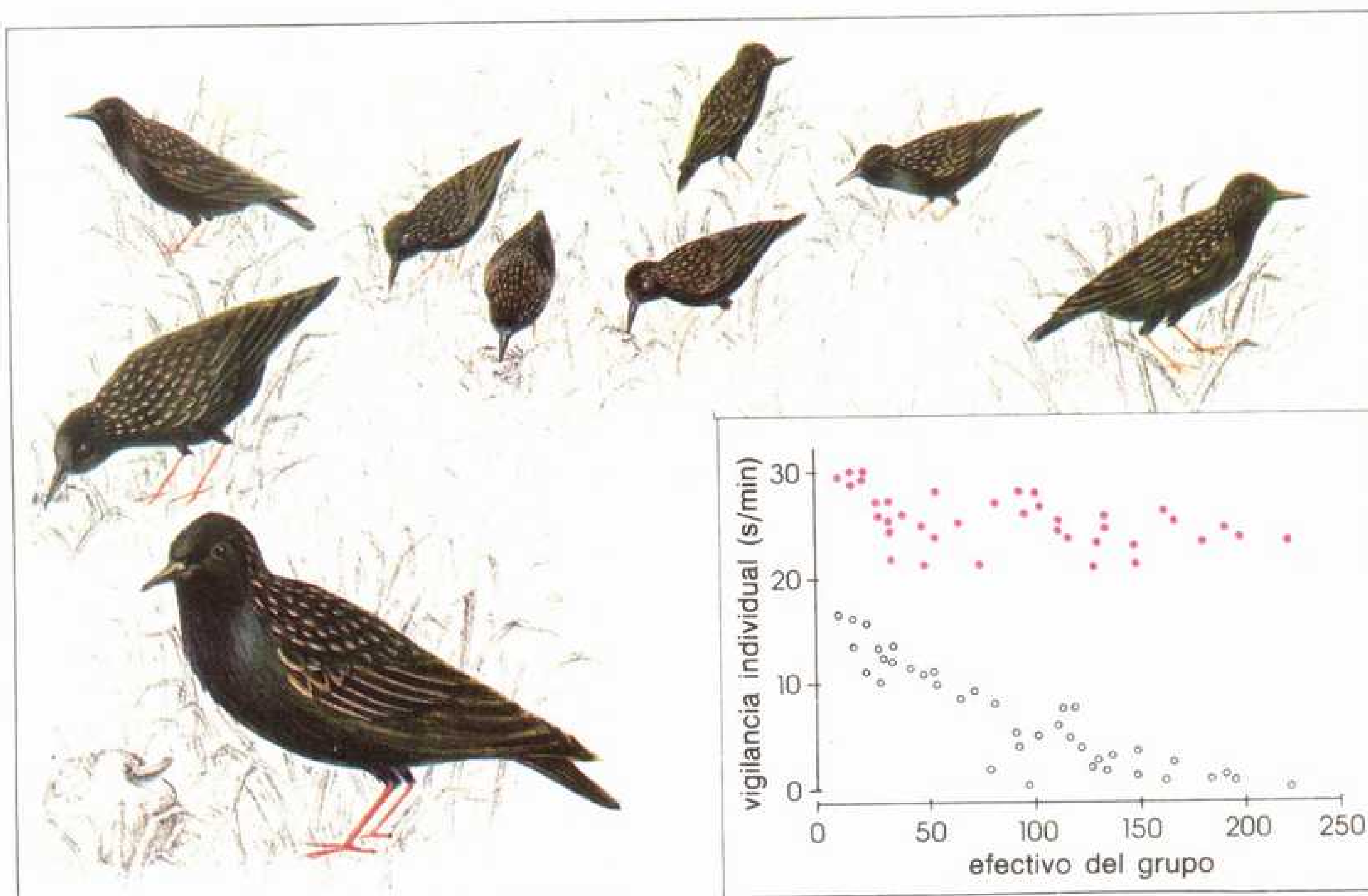
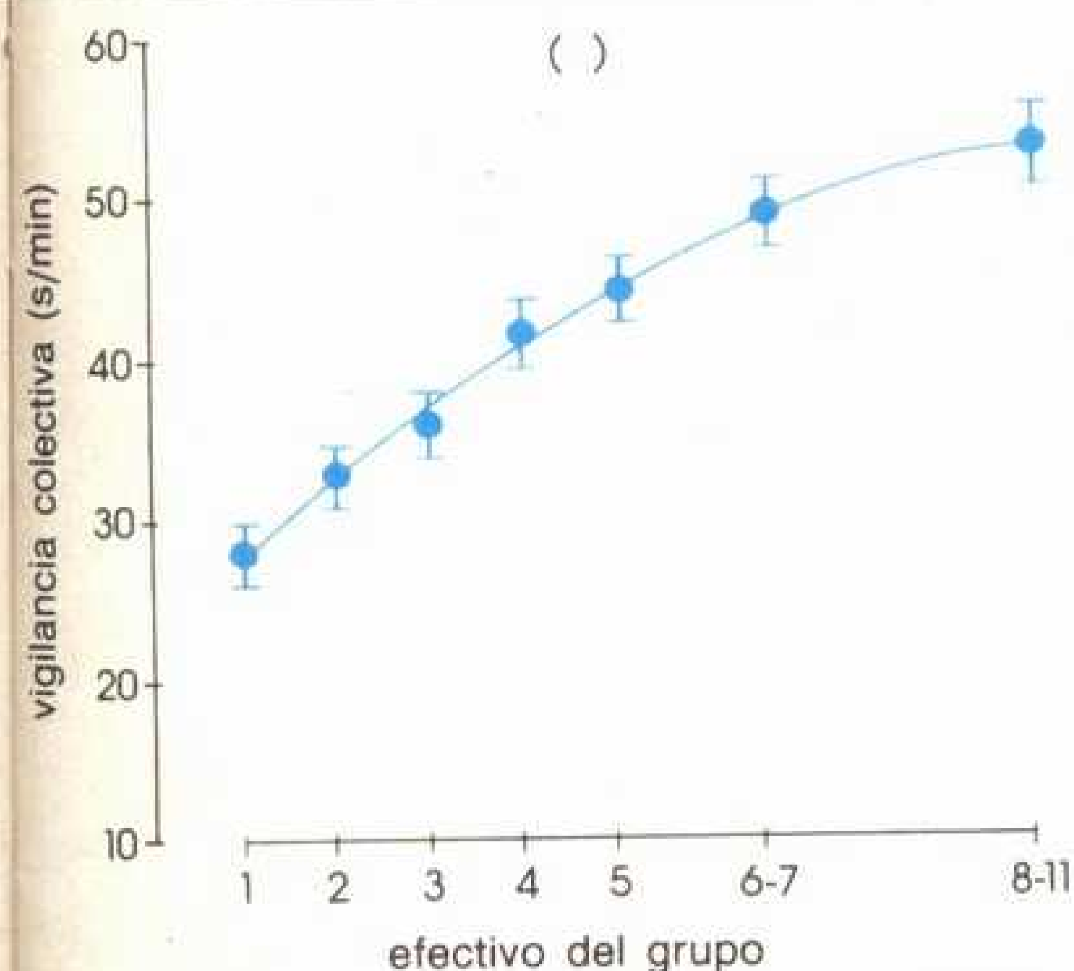


Figura 5. Los predadores, como los peces, halcones o gatos, atacan preferentemente a sus presas en la periferia de los grupos. Los animales que son presas potenciales ajustan su comportamiento de vigilancia a su posición espacial en el grupo: en un grupo de estorninos pintos, los individuos que se encuentran en el centro (puntos blancos) vigilan menos que los individuos periféricos (puntos de color). Cuando el número de individuos del grupo aumenta, se observa que el comportamiento de vigilancia disminuye (como en la fig. 4.)[22]





(15) M. Milinski, *Anim. Behav.*, *32*, 1157, 1984.
(16) M. Milinsky, R. Heller, *Nature*, *275*, 642, 1978.
(17) D.W. Lendrem, *Anim. Behav.*, *32*, 298, 1984.
(18) T. Caraco y col., *Auk*, *97*, 872, 1980.
(19) K.A. Sullivan, *Anim. Behav.*, *33*, 328, 1984.
(20) T. Caraco y col., *Nature*, *285*, 400, 1980.
(21) N.B. Metcalfe, R.W. Furness, *Behav. Ecol. Sociobiol.*, *15*, 203, 1984.
(22) T. Jennings, S. Evans, *Anim. Behav.*, *28*, 634, 1980.
(23) J.G. Robinson, *Anim. Behav.*, *29*, 1036, 1981.

El hecho de que los animales sean más o menos visibles por los predadores también modifica el comportamiento de vigilancia. En los patos, las hembras que incuban tienen un plumaje cuyo color más apagado les permite pasar desapercibidas. Los machos, por el contrario, durante la época de la reproducción presentan vivos colores y son muy visibles, lo que les hace muy localizables por los predadores. Como ha demostrado D. Lendrem en el ánade real, los machos ajustan su comportamiento de vigilancia consecuentemente: vigilan más que las hembras.[24] Cuando duermen a la orilla de un río, los patos tienen el mismo problema que cuando se alimentan: periódicamente tienen que interrumpir su actividad para detectar la eventual proximidad de un predador; para ello abren brevemente los ojos (o uno solo) a cortos intervalos. Los machos vigilan más que las hembras, incluso durante el sueño. Pero después del período reproductivo, los machos mudan y adquieren un plumaje pardo; a partir de este momento reducen su comportamiento de vigilancia y disponen de más tiempo para dormir (fig. 6). Por tanto, su comportamiento de vigilancia depende bastante de si son más o menos localizables por sus predadores.

Simétricamente, el comportamiento de vigilancia también depende de las posibilidades que tienen los animales para detectar a sus predadores, las cuales están determinadas, por ejemplo, por la extensión del campo visual. Para el vuelvepiedras o el correlimos oscuro, la visibilidad en una costa puede encontrarse más o menos reducida por las rocas. En estas condiciones, según Metcalfe, las aves compensan la reducción de la visibilidad mediante un incremento de su comportamiento de vigilancia: por ejemplo, pasan más tiempo con la cabeza levantada mientras buscan comida[25] (fig. 7). Como estas aves de costa en general se encuentran en grupo, este resultado no puede imputarse totalmente a un incremento de la vigilancia destinada a la detección de los predadores. Como es sabido, en el grupo los animales ajustan su comportamiento al de sus congéneres. Por tanto, es posible sospechar que el aumento de la vigilancia, cuando la visibilidad es reducida, sea dirigida, en parte, hacia sus propios congéneres (o sea hacia la detección de las presas).



Figura 6. Los animales más fácilmente detectables son los que más vigilan. Así, en el ánade real, el macho presenta vivos colores durante la estación reproductora y por ello vigila su entorno más que la hembra, de colores más apagados. Durante el cambio de plumaje (muda), la frecuencia de vigilancia se reduce. Este comportamiento de vigilancia se observa tanto durante la búsqueda de alimento como durante el sueño. (Foto Jacana.)

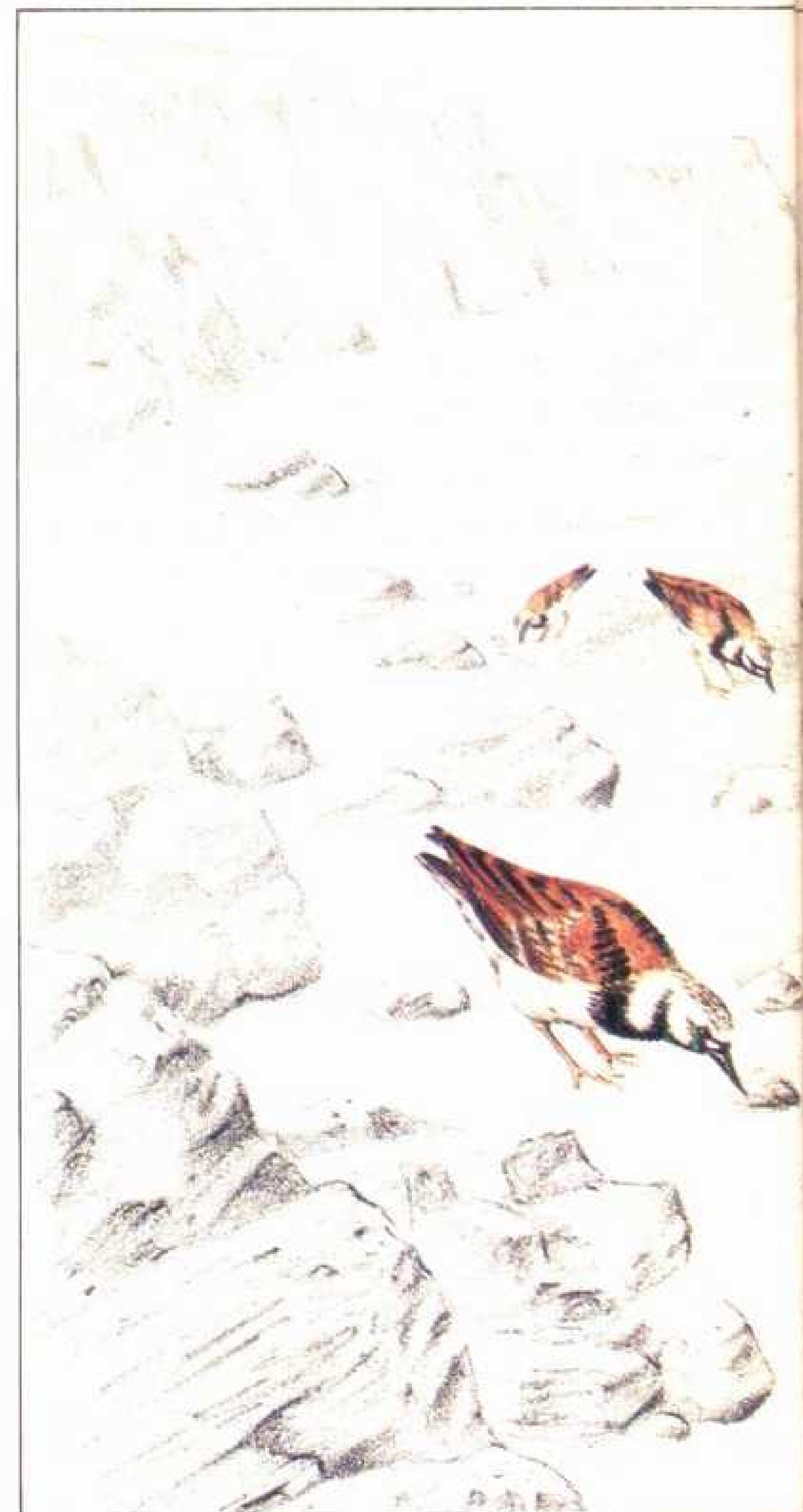
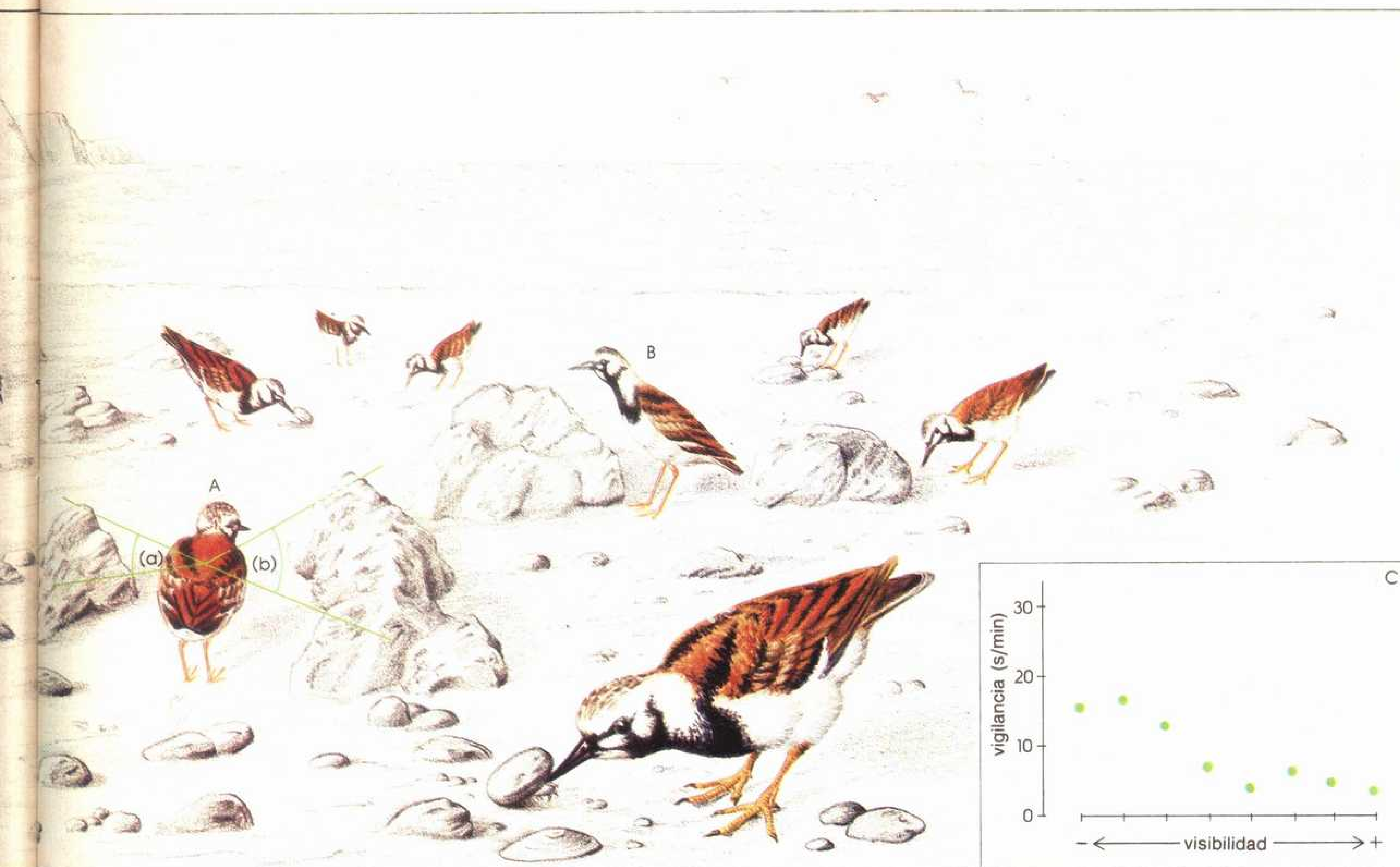


Figura 7. El comportamiento de vigilancia de las aves depende de la posibilidad que tienen de detectar a los predadores. Esta posibilidad puede estar determinada por la extensión de su campo visual. En los vuelvepiedras de las costas de Escocia, su campo visual puede ser reducido por rocas. En (A), dos rocas obstruyen, en el plano horizontal un ángulo total (a + b) de aproximadamente 102º. En (B), en el campo visual es más reducido, en el plano vertical, por la roca de la izquierda que por la de la derecha. Las aves ajustan su coportamiento de vigilancia a las condiciones de visibilidad (C): por ejemplo, los vuelvepiedras pasan más tiempo vigilando (con la cabeza alta) mientras se alimentan, si su visibilidad está reducida.[25]

¿Y los primates?

Ya hemos hablado mucho de la vigilancia respecto a los predadores, objeto de numerosas investigaciones. Por el contrario, la vigilancia necesaria para la detección de presas y la vigilancia de los congéneres han sido estudiadas mucho menos. En especial, los resultados sobre la vigilancia destinada a la detección de las presas son muy fragmentarios y casi limitados a los chorlitos, estudiados por M. Pienkowski, de la universidad de Durham (Gran Breataña)[26] y las avefrías estudiadas por N. Metcalfe.[27] En lo que se refiere a la vigilancia de los congéneres, los resultados no son precisamente más abundantes y casi están limitados a los primates no humanos. En los talapuínos, unos pequeños monos que viven en grupos en África ecuatorial, los individuos extraños al grupo son objeto de una vigilancia especial, como han demostrado dos investigadores británicos de Birmingham, D. Scruton y J. Herbert.[28] Se establece una



jerarquía en la vigilancia, ya que los individuos de rango inferior (los «dominados») vigilan más que los demás, y se centran, sobre todo, en los animales «dominantes».[29] En otro mono, el capuchino de la selva de Venezuela, J. Robinson intentó desglosar el tiempo empleado en la vigilancia de los predadores, la de los congéneres (especialmente la de los extraños al grupo y de los individuos «dominantes») y la vigilancia dirigida a la detección de los recursos alimentarios (fruta y pequeños insectos).[23] Los resultados de este investigador demuestran que, en las condiciones de su observación, el comportamiento de vigilancia tiene principalmente una función antipredadora.

Como sugieren las observaciones que realiza uno de nosotros, J.-P. Desportes, de unos macacos de Barbaria que viven en una reserva francesa de unas diez hectáreas, no hay duda de que es necesario recurrir a condiciones muy especiales (depuradas de alguna manera) para llegar a distinguir las demás formas de vigilancia. Por esta razón, una reserva se encuentra bastante cerca del ideal: no hay predadores, la detección de los recursos alimentarios no plantea problemas (se esparcen pipas de girasol por el suelo) y el comportamiento de vigilancia de los macacos se dirige básicamente hacia sus congéneres. El desarrollo secuencial de ese comportamiento ejemplifica perfectamente cómo los animales establecen un compromiso entre la vigilancia y la búsqueda de alimento: los macacos recogen, cabizbajos, las pipas de girasol. Cuando han acumulado un puñado se las comen efectuando, con la cabeza levantada, un barrido visual en torno a ellos durante algunos segundos. De esta manera la búsqueda de comida (al menos su fase final: el consumo) y la vigilancia no son tan incompatibles como parece a primera vista.

No son solamente las condiciones reunidas en una reserva de macacos las que son interesantes para el análisis del comportamiento de vigilancia de los congéneres: desde este punto de vista, la observación de una especie «particular», el hombre no carece de interés. Hace unos diez años, analizando filmaciones de personas comiendo, I. Eibl-Eibesfeldt, un investigador alemán, hoy director del Centro de Investigación de Etología Humana del Max Planck Institut, se observaron los hechos siguientes: después de algunos bocados, los individuos levantan la vista de su plato y miran a su alrededor.[30] Según Eibl-Eibesfeldt, este comportamiento sería «automático», ya que actualmente no hay demasiado peligro para el hombre cuando come. Pero como han demostrado M. Argyle y M. Crook, respectivamente de la universidad de Oxford y de Swansea (Gran Bretaña), la duración de la frecuencia de miradas dirigidas hacia otras personas varía demasiado con las situaciones y según los individuos para que se pueda llegar a la conclusión de que se trata de un «automatismo» de la exploración visual en el hombre (o un vestigio de la evolución) que ya no sirve para nada.[30] El estudio del ajuste de este comportamiento a las distintas situaciones en las que se produce y el de su variabilidad interindividual (por ejemplo, según las observaciones que está realizando J.-P. Desportes, efectuadas en una biblioteca universitaria, parece ser que las estudiantes miran más hacia su alrededor que los estudiantes) podrían llegar a ser de gran interés para el análisis más profundizado de la vigilancia en condiciones en que los predadores no existen, en principio. Solamente en principio, ya que como decía el etólogo Plauto (254-184 antes de J.C.), poeta cómico en sus ratos de ocio, el hombre es un lobo para el hombre... ■

Para más información:

- P.N. Lehner, *Handbook of ethological methods*, STPM Press, Nueva York, 1979.
- J. Altmann, «Observational studies of behaviour: sampling methods», *Behaviour, 44*, 247, 1974, sobre los métodos de recogida de muestras.
- J.R. Krebs, «Behavioural aspects of predation», en *Perspectives in ethology*, vol. 1, P.P.G. Bateson y P.H. Klopfer (eds.), Plenum Press, Nueva York, 1973, p. 73; B.C.R. Bertram, «Living in groups: predators and prey», en *Behavioural ecology*, J.R. Krebs y N.B. Davies (eds.), Blackwell, Oxford, 1978, p. 64; H.R. Pulliam y T. Caraco, «Living in groups: is there an optimal group size?», en *op. cit.*, p. 122.
- M. Argyle y M. Crook, *Gaze and mutual gaze*, Cambridge University Press, 1976.

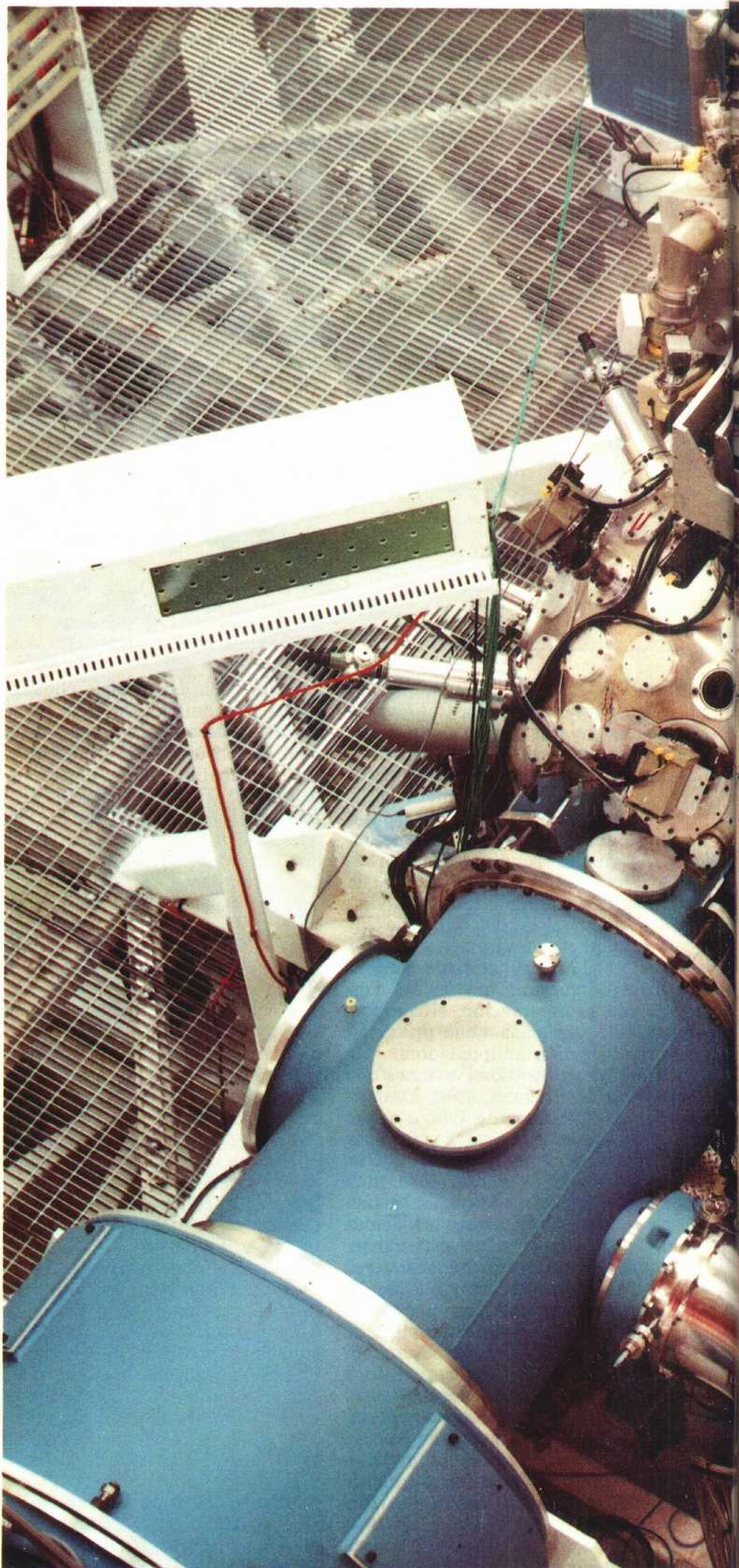
La revista *Animal Behaviour*, editada por la Association for the Study of Animal Behaviour, publica la mayoría de los artículos sobre el comportamiento de vigilancia.

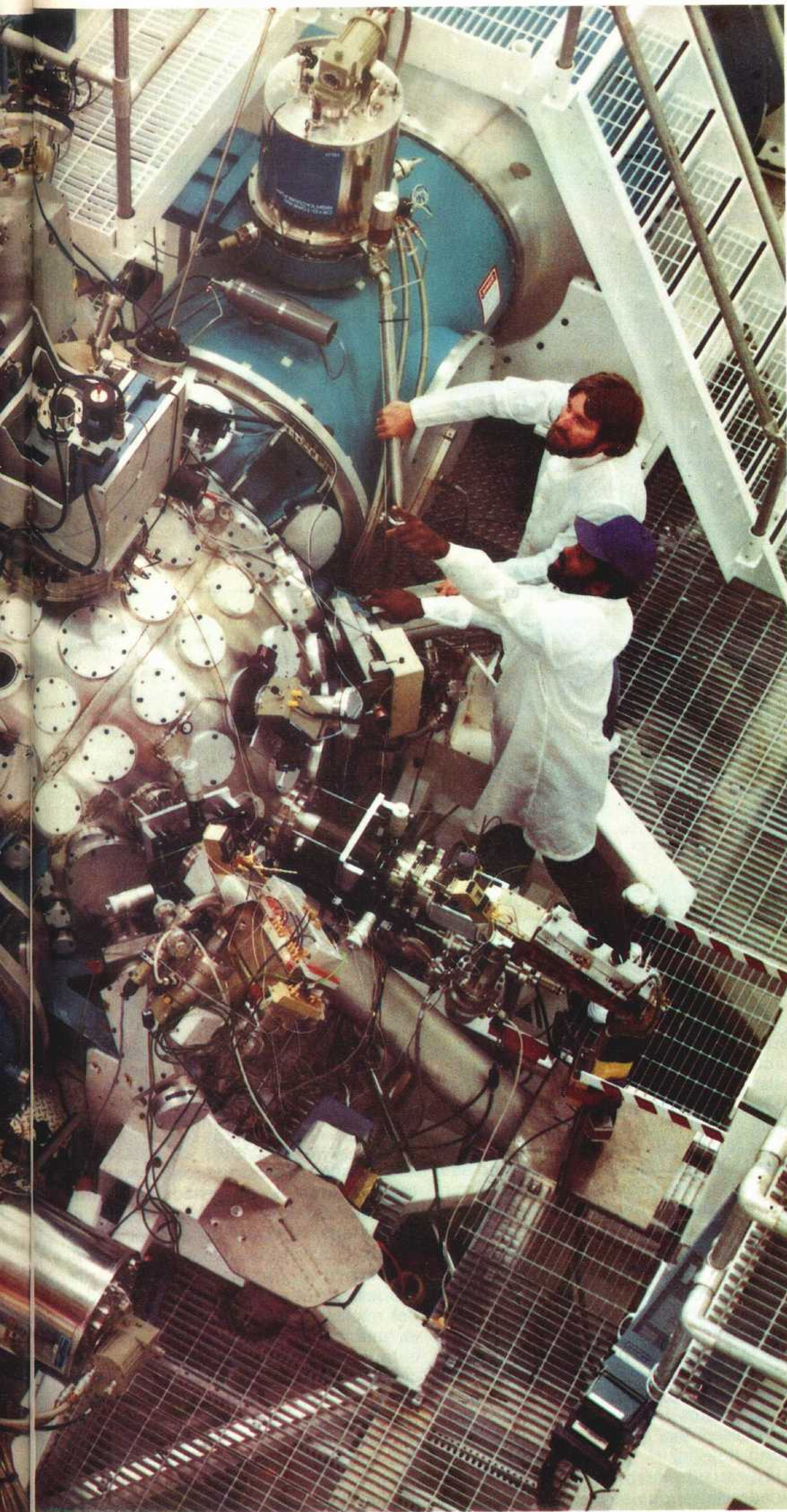
(24) D.W. Lendrem, *Anim. Behav.*, *31*, 532, 1983.
(25) N.B Metcalfe., *Anim. Behav.*, *32*, 981, 1984.
(26) M.W. Pienkowski, *Anim. Behav.*, *31*, 244, 1983.
(27) N.B. Metcalfe, *Z. Tierpsychol.*, *67*, 45, 1985.
(28) D.M. Scruton, J. Herbert, *Anim. Behav.*, *20*, 463, 1972.
(29) E.B. Keverne y col., *Anim. Behav.*, *26*, 933, 1978.
(30) I. Eibl-Eibesfeldt, *Grundiss der vergleichenden Verhalteansforschung*, Munich, Piper Verlag, 1972.
(31) M. Argyle, M. Crook, *Gaze and mutual gaze*, Cambridge University Press, 1976.

El láser de rayos X

por Pierre Jaeglé

Hoy el láser está en todas partes. Por supuesto, en los laboratorios de investigación, fundamental o aplicada, pero también en las fábricas de producción industrial y en los hospitales; también con los aficionados a la alta fidelidad. Vemos pues cuán grande es la diversidad de su presencia. No obstante, al pastel le falta la guinda: un láser que emita a una longitud de onda de un orden igual o inferior al centenar de angströms, es decir, un láser de rayos X. Durante mucho tiempo, la mayoría de los especialistas compartían la opinión de que el campo de las longitudes de onda muy cortas quedaría cerrado definitivamente a la realización de láseres. Pero los experimentos de estos últimos años en Livermore, Princeton y Palaiseau han demostrado que el camino que lleva a la realización de un láser X está abierto. Pierre Jaeglé uno de los precursores en esta vía, nos presenta aquí la historia fascinante de estas investigaciones y nos indica con precisión el camino que queda por recorrer hasta llegar a las sorprendentes aplicaciones que cabe esperar, sobre todo en biología.





Conocemos hoy una considerable variedad de láseres. De la medicina a la fusión termonuclear, pasando por la holografía, la microelectrónica y las telecomunicaciones, la lista de sus aplicaciones es impresionante. Están presentes en los laboratorios de investigación fundamental o aplicada, en las fábricas de producción industrial y también dispone de ellos el aficionado a la alta fidelidad. Esta notable difusión se explica fácilmente. Ante todo, un láser es una fuente de luz producida, y sobre todo amplificada, por «emisión estimulada», es decir, de acuerdo con un mecanismo distinto del de una fuente clásica. De ahí derivan las excepcionales propiedades de su radiación: fuerte intensidad, dirigibilidad, coherencia óptica, monocromatismo (una sola longitud de onda emitida). A una longitud de onda dada, un láser puede radiar una potencia considerablemente superior al de todas las fuentes clásicas. Para los láseres actuales más potentes, esta potencia se cifra en billones de watios. Pero el desarrollo de los láseres sigue enfrentando a una importante limitación: todavía no existe un auténtico láser de rayos X.

En física, sin embargo, no hay diferencia fundamental alguna entre los rayos X y la radiación que nos permite ver los objetos que nos rodean. Se trata, en ambos casos, de una radiación electromagnética que se propaga de un modo ondulatorio. Sólo varía la longitud de onda de las vibraciones: es varios miles de veces más pequeña en los rayos X que en la luz visible. Actualmente, los láseres cubren un amplio campo de longitudes de onda que se

Figura 1. Actualmente existe una variedad considerable de láseres. Para una longitud de onda dada, pueden radiar una potencia considerablemente mayor que una fuente clásica de luz. El abanico de estas longitudes de onda, inicialmente limitada al campo de las microondas, se ha ido desplazando propiamente hacia la luz visible y ultravioleta. Pero este desarrollo ha topado siempre con una importante limitación, ya que todavía no existe un verdadero láser de rayos X, es decir, un láser que opere a una longitud de onda del orden del centenar de angströms o menos. Pero esta situación está cambiando rápidamente. Algunos experimentos recientes han puesto de manifiesto que puede obtenerse un efecto láser en la zona de los rayos X «blandos» (de 100 a 200 angströms). Los más espectaculares, sin duda, son los del laboratorio Livermore, en Estados Unidos. Consisten en crear un plasma por irradiación muy breve de un blanco sólido de selenio con la ayuda del láser NOVA, el más potente del mundo. Este plasma es un medio que reúne las condiciones necesarias para que en las longitudes de onda cortas se dé el efecto láser. En el centro de la foto aparece la cámara de reacción en la que se crea el plasma. La radiación láser X, emitida según el eje del plasma, es analizada y medida por un espectrógrafo, que se distingue a la derecha montada a un lado de la cámara. Los dos haces del láser NOVA que sirven para crear el plasma llegan a la cámara por los dos grandes tubos azules. Su diámetro es de 74 centímetros. (Foto Laboratorio Livermore.)

En un láser, la luz se va amplificando por emisión estimulada.

extiende desde las microondas hasta la luz visible y ultravioleta. Pero impone un gran salto el pasar del ultravioleta, en el que los láseres son de uso corriente hasta una longitud de onda de 2 000 angströms, hasta los rayos X «blandos» de 100 angströms.

En realidad, esta longitud de onda está a medio camino entre el ultravioleta lejano y los rayos X «duros», que penetran los metales, el hormigón y los tejidos vivientes y dan por radiografía unas imágenes de lo que de otro modo quedaría oculto. Estos rayos X duros sirven de sonda para la materia. Permiten estudiar la disposición de los átomos, su entorno y el tipo de orden a que obedecen. Se utilizan para descifrar la estructura de enormes moléculas que comportan miles de átomos. Constituyen el fundamento de nuevas tecnologías destinadas a la microelectrónica. Los rayos X blandos, por su parte, son fácilmente interceptados por un grosor de materia muy pequeña. Una a dos micras de una hoja de aluminio bastan para debilitarlos considerablemente. Pero ello no es óbice para que sus propiedades sean muy interesantes. Por ejemplo, no son fuertemente destructores: un láser de rayos X blandos sería el instrumento ideal para la observación de células vivientes con fines médicos o biológicos. Sus cortas longitudes de onda permiten pensar en imágenes de más alta definición que las de la microscopía ordinaria; además, sería posible producir por holografía fotografías instantáneas en tres dimensiones de las células.

No es posible ignorar que en la estrategia de la guerra del espacio figuran en lugar destacado potenciales realizaciones de láseres de rayos X. Pero no son para un futuro próximo ya que recurren a una radiación mucho más dura, que se ignora cómo producir en los láseres, y requieren tales medios de investigación que ningún laboratorio ordinario podría acogerlos.

Las investigaciones llevadas a cabo hasta el momento han permitido observar las primeras emisiones de luz láser entre unos 100 y 200 angströms de onda (fig. 1). ¿Qué significan exactamente estos resultados? ¿Cómo han sido obtenidos? ¿Y por qué han tardado tanto tiempo?

La emisión láser tiene unas particularidades tales, que se conocen pocos casos en los que tenga lugar naturalmente, sin intervención de la técnica humana. Nuestras fuentes de luz habituales, sean naturales, como el Sol y las estrellas, o artificiales, como las velas y lámparas, poseen un mecanismo de emisión de radiación llamado «espontáneo». El láser, por su parte, funciona con un mecanismo de emisión «estimulado». Veamos en qué consiste la diferencia.

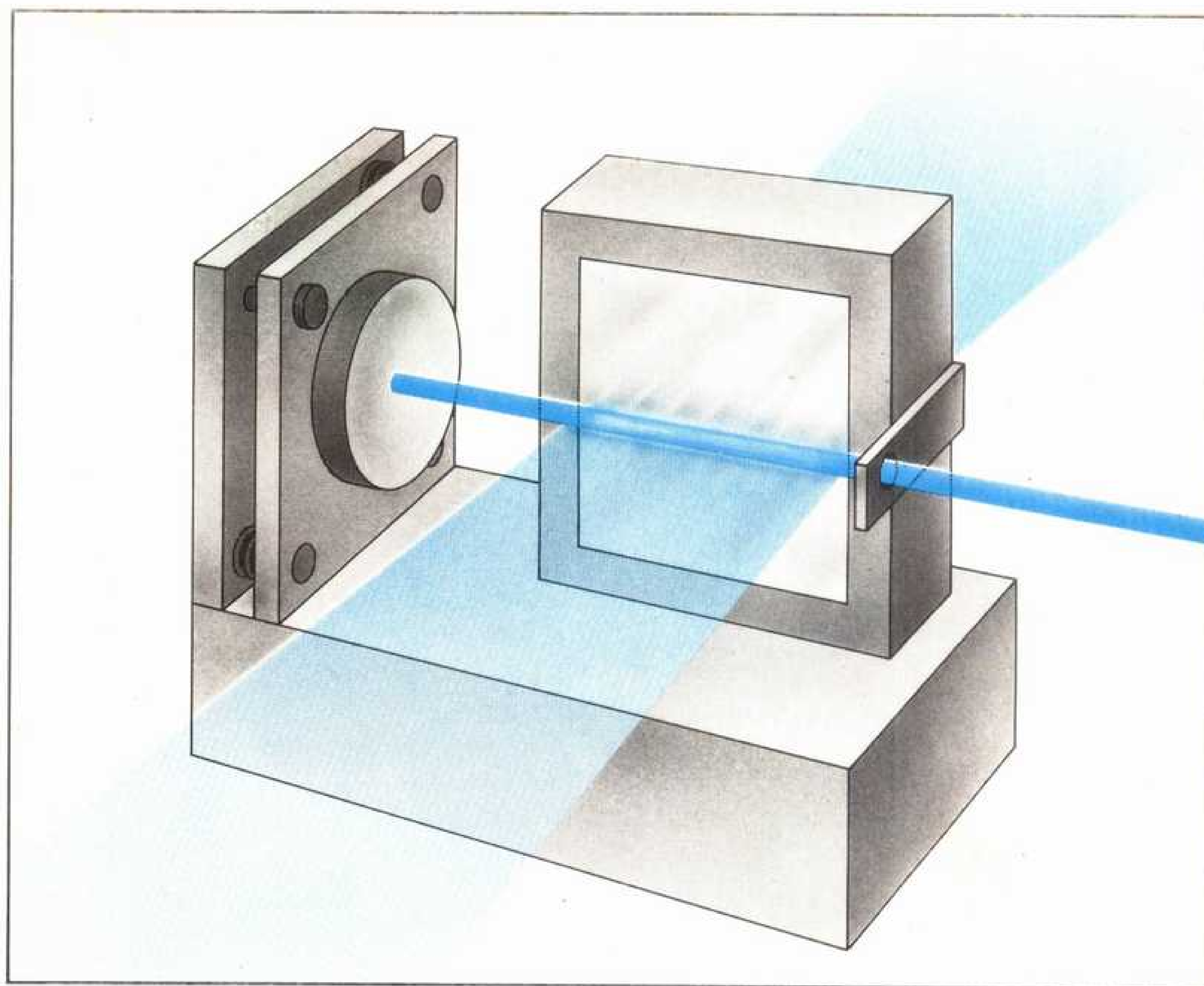


Figura 3. Una serie de experimentos realizados en los laboratorios de Livermore y Princeton (Estados Unidos), en el laboratorio Rutherford (Gran Bretaña) y en Palaiseau (Francia) han permitido observar las primeras emisiones de luz láser entre 100 y 200 angströms de longitud de onda. En dichos experimentos se crea un plasma caliente (de 1 a 10 millones de grados) muy alargado, focalizando uno o varios haces (dos en la figura) de un láser de gran potencia (de 100 a 1 000 Gigawatios) sobre un blanco plano. Los electrones libres del plasma producen las «inversiones de población» entre los niveles excitados de los iones del plasma, bien por un encadenamiento de efectos colisionales y radiactivos cuando el plasma está cerca de su temperatura máxima, bien por recombinación con los iones durante el enfriamiento del plasma. El efecto láser tiene lugar según la dirección del eje del plasma. Puede utilizarse un espejo (a la izquierda en la figura) para aumentar la longitud total recorrida por los fotones en el plasma. Sin embargo, los mejores espejos de rayos X tienen un coeficiente de reflexión todavía pequeño (del 10 al 15 %). Así pues, el aumento directo de la longitud de las columnas de plasma amplificador figuran indefectiblemente en todos los programas de investigación.

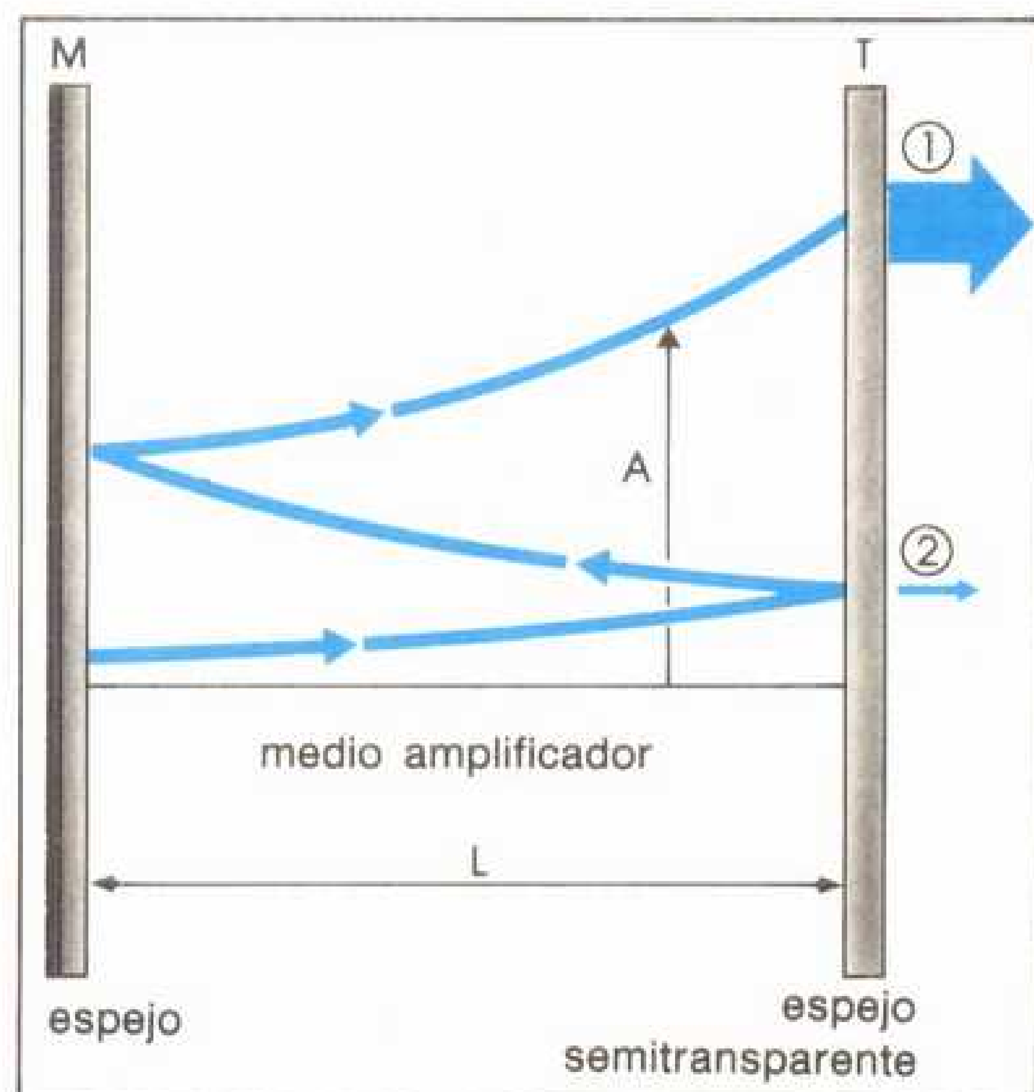


Figura 2. Un láser consta básicamente de un medio amplificador (sólido, gas o plasma) situado entre dos espejos uno de los cuales es semitransparente. Con la ayuda de una fuente de radiación exterior, se hace pasar una importante población de átomos del medio amplificador a un estado excitado, con lo cual se consigue una inversión de población.
Al desexcitarse, estos átomos emiten unos fotones que poseen una elevada probabilidad de encontrarse con otro átomo en un estado excitado y desencadenar así la emisión de un nuevo fotón de igual energía y dirección que el primero. Este fenómeno, llamado emisión estimulada, permite producir y amplificar progresivamente un haz láser. Esta curva muestra el incremento de la amplitud luminosa A provocada por dicho proceso. En ausencia de espejo, esta amplificación sólo tiene lugar a lo largo de la longitud L del plasma. La correspondiente intensidad saliente está representada por la flecha 2. Pero como que la intensidad saliente crece de manera exponencial con la longitud recorrida por los fotones en el medio amplificador, resulta más provechoso realizar una cavidad óptica por medio de dos espejos M y T. En tal caso, la amplificación se produce a lo largo de toda una serie de recorridos de ida y vuelta entre los dos espejos. En la figura se ha representado un solo ciclo. La intensidad saliente se indica mediante la flecha 1.

Pierre Jaeglé es director de investigación en el CNRS. Desde 1975 dirige el laboratorio de espectroscopia atómica y iónica de Orsay. Fue uno de los primeros que en Europa trabajaron en el campo X-UV con la radiación sincrotrón. En 1967-1968 se especializó en el estudio de la radiación de los plasmas calientes. Dirige uno de los equipos del GRECO «Interacción Láser-Materia» del CNRS en la École Polytechnique de Palaiseau.

El efecto láser

A nivel microscópico, de entrada, la emisión de radiación procede en ambos casos de átomos cuyo estado se modifica bruscamente. Como bien se sabe, el átomo está formado por un núcleo rodeado de electrones. Como sus electrones tienen acceso a una infinidad de órbitas posibles, más o menos alejadas del núcleo, el átomo puede encontrarse en una infinidad de estados diferentes, entre los que puede cambiar por excitación, por ejemplo, al chocar con una partícula vecina que transmita un poco de energía al electrón y lo aleje del núcleo, o al contrario, por desexcitación con emisión eventual de fotones. A nivel macroscópico, el del gas formado por los átomos, todos los estados posi-

bles están generalmente poblados de manera estadística de acuerdo con una ley fijada por la termodinámica, en la que interviene la temperatura del gas (ley de Boltzmann). En un medio de esta clase no puede haber efecto láser: la emisión de radiación es sobre todo «espontánea» y está formada por los fotones producidos por transiciones atómicas espontáneas, es decir, sin causa externa, de los estados muy excitados a estados menos excitados.

Pero cabe imaginar maneras muy particulares de crear estados excitados en el gas. Basta para ello con disponer de una fuente de radiación exterior que emita grandes cantidades de fotones con la energía necesaria para excitar un cierto estado de los átomos del gas. La absorción de los fotones de la fuente por el gas lleva a una importante población de átomos hasta el estado excitado correspondiente. Es el denominado «bombeo óptico». En vez de una población aleatoria de estados excitados, como la anterior, este bombeo crea preferentemente una importante población en un solo estado excitado. Cuando la población de un cierto estado excitado se vuelve netamente superior a la población de estados menos excitados, se dice que hay «inversión de población».

Es entonces cuando podrá producirse el efecto láser. Supongamos que un fotón sea espontáneamente emitido por un primer átomo que, por bombeo, ha sido llevado a un estado excitado. A causa de la inversión de población, este fotón tiene una gran probabilidad de encontrarse con otro átomo que esté en el mismo estado excitado. ¿Qué ocurre en tal caso? En vez de escaparse libremente del gas o de ser absorbido por él, el fotón puede obligar al segundo átomo a efectuar una transición hacia un estado menos excitado y menos poblado. El segundo átomo emite entonces un fotón suplementario. A este mecanismo se le llama emisión estimulada, ya que requiere una causa externa, el choque del electrón en un fotón que tenga la energía conveniente. A su vez, el nuevo fotón chocará con otros átomos excitados y los desexcitará por emisión estimulada. El proceso de emisión se va amplificando: un medio en el que se realiza una inversión de población se comporta como un amplificador de radiación por emisión estimulada. Es el principio del efecto láser (fig. 2).

Una notable consecuencia es que las propiedades de un gas bombeado ópticamente y convertido en sede de una emisión láser son completamente distintas de las de una fuente de luz ordinaria. En el filamento incandescente de una lámpara corriente, dado el carácter aleatorio de la distribución de los estados excitados de los átomos emisores, la radiación puede emitirse en todas direcciones: estas lámparas son isótropas. De otra parte, si se aumenta el volumen de materia incandescente, la cantidad de luz emitida en cada dirección aumenta menos rápidamente que la dimensión del volumen en dicha dirección, ya que una proporción creciente de fotones queda reabsorbida antes de escapar de la materia del filamento.

En la emisión láser ocurre todo lo contrario. En primer lugar, como que la emisión estimulada se produce en la misma dirección que la del fotón incidente que la provoca, la amplificación da lugar a una emisión fuertemente dirigida, situada en el interior de un cono estrecho; no a una emisión isótropa. De otra parte, si se aumenta la longitud de la columna de gas bombeada ópticamente, el fenómeno de amplificación da como resultado el que el brillo de la fuente aumente más deprisa que la longitud de la columna. El brillo se define como la cantidad de radiación emitida por unidad de superificie emisiva por unidad de tiempo y unidad de ángulo sólido de emisión. Se puede demostrar que el brillo de una fuente láser crece exponencialmente con la longitud del medio emisor. Una emisión muy dirigida, un crecimiento exponencial del brillo, tales son algunas de las propiedades características de las fuentes láser.

Hay otras. Así, el mecanismo de emisión estimulada tiende a correlacionar entre sí las emisiones individuales de los átomos del gas, mientras que en la emisión espontánea los átomos tienen un comportamiento aleatorio. El haz emitido por un láser tendrá pues unas propiedades de coherencia óptica en general ausentes de las fuentes tradicionales. Esta coherencia es interesante en muchas aplicaciones de los láseres que recurren a las propiedades ondulatorias de la radiación y a la vez requieren una gran intensidad de luz. Es el caso de la producción de hologramas para la restitución de imágenes en relieve de objetos fotografiados.

Antes de ver cómo se aplican estas nociones generales al caso de los rayos X, hay que precisar que un láser no está formado sólo por el medio amplificador, la columna de gas de los ejemplos anteriores, sino también por una cavidad óptica que desempeña un papel importante. De un modo esquemático, esta cavidad está formada por dos espejos paralelos entre los cuales se encuen-

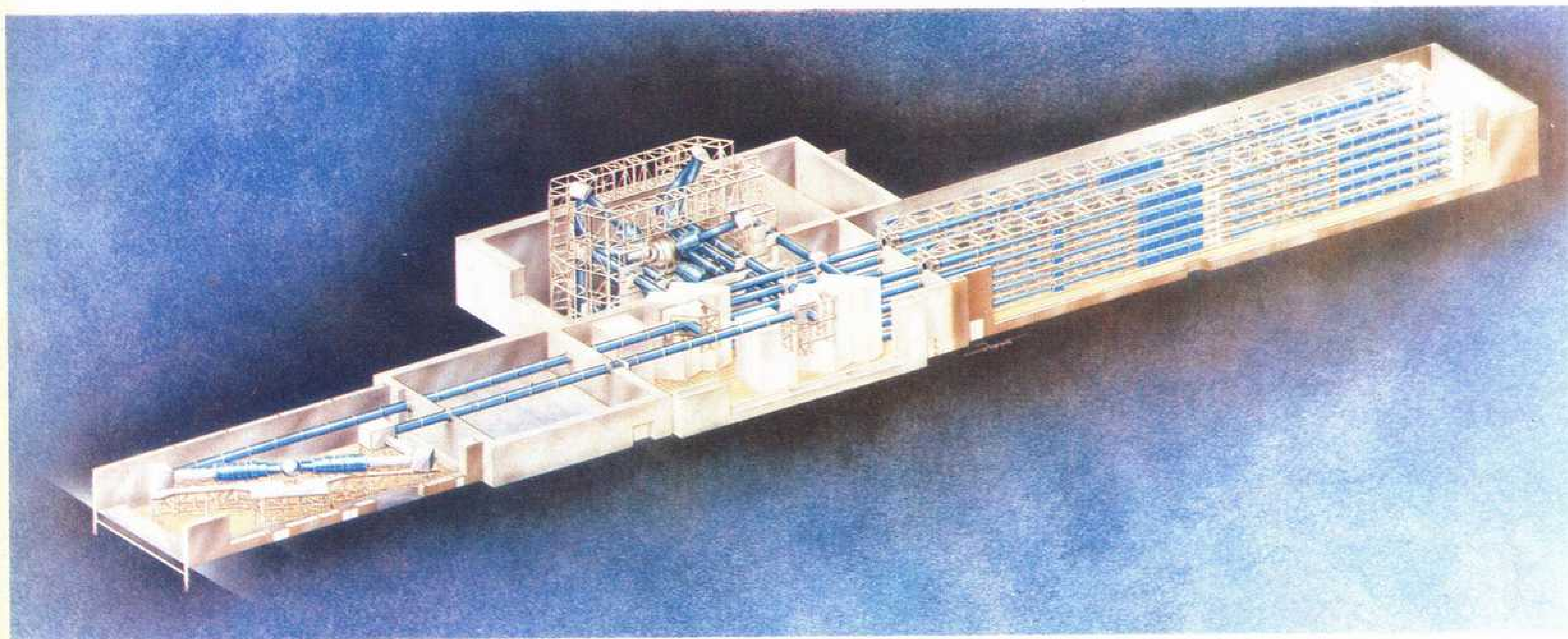


Figura 4. El láser NOVA, en funcionamiento en el laboratorio Livermore, está dividido en diez haces separados. Su potencia total puede alcanzar los 100 terawatios (100 mil millones de watios). En la mitad derecha de la figura se distinguen las cadenas de amplificación de los diez haces. Instalado en el extremo de la izquierda del edificio, el experimento láser X utiliza dos haces de NOVA para crear el plasma de selenio, medio amplificador para la emisión láser X. Se puede obtener la escala comparando esta figura con la figura 1. En el centro, se encuentra el gran recinto en el que pueden concentrarse todos los haces destinados a experimentos de confinamiento inercial del plasma. Estos experimentos forman parte de un programa de investigación sobre la fusión termonuclear controlada (Foto Laboratorio Livermore.)

La base de los láseres de rayos X reside en los plasmas calientes.

tra el medio activo. Uno de los espejos está fabricado de tal modo que en él hay una ventana de salida para la radiación. Gracias a esta cavidad, la radiación efectúa un gran número de recorridos de ida y vuelta entre ambos espejos antes de escapar por la ventana de salida. En otras palabras, la cavidad permite aumentar la longitud efectiva recorrida por los fotones en el medio amplificador y, por tanto, la intensidad total radiada por el láser. Elimina además gran parte de la radiación espontánea residual que constituye un ruido parásito con respecto a la emisión láser. En lenguaje especializado se dice que la cavidad afina la selección de los modos amplificados por el láser. Digamos de inmediato que los rayos X, por desgracia, se prestan muy mal a la realización de tales cavidades, pues no existen verdaderos espejos para reflejarlos.

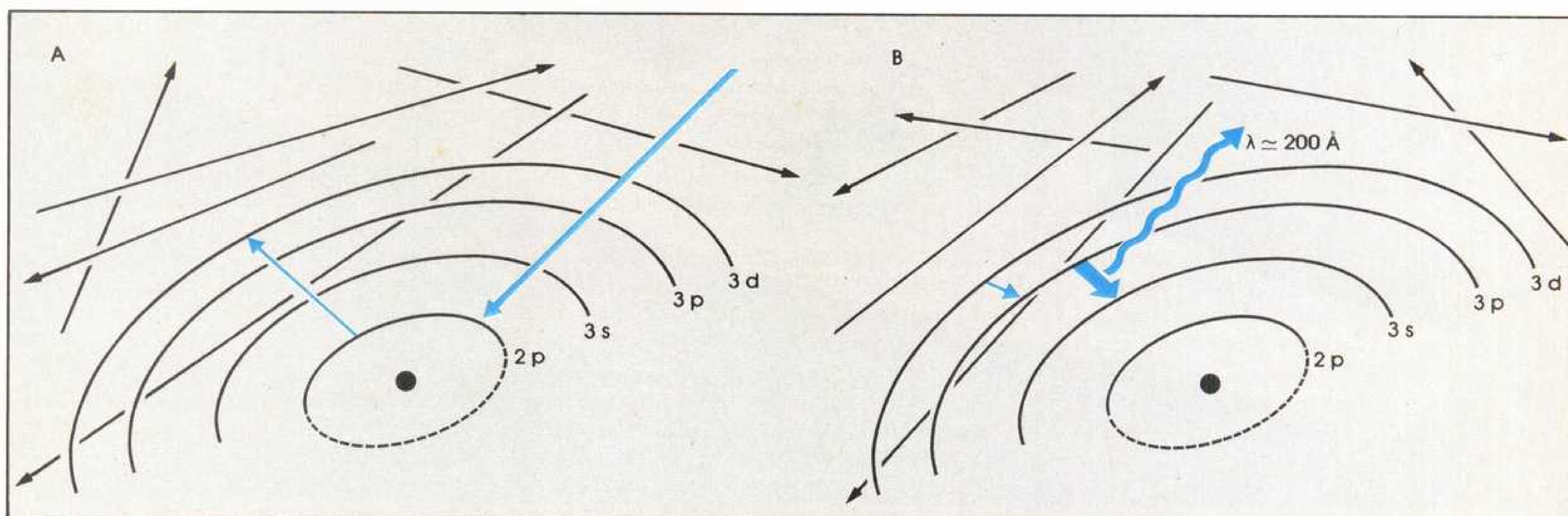
Dos caminos hacia el láser X

Los desarrollos de estos últimos veinte años han respetado estos principios generales; han desembocado en una variedad considerable de tipos de láser y propiciado múltiples aplicaciones en tecnología, producción industrial, medicina y también en la investigación. El abanico de longitudes de onda disponibles, limitado al principio a las muy grandes (campo de las microondas y del infrarrojo), se ha ido desplazando hacia el sector visible, que cubre ya por entero, y hacia el ultravioleta próximo o medio.

Pero la mayoría de los especialistas creían que el dominio de los rayos X quedaría definitivamente vetado a los láseres. Es lo que se desprende de un argumento aparentemente incontrovertible, argumento que es interesante exponer en detalle porque indica una de las grandes dificultades que ha sido preciso vencer para lograr los progresos actuales. Este argumento se basa en la comparación de los coeficientes fundamentales que rigen la teoría de la radiación. Existe un coeficiente para cada uno de los tres procesos susceptibles de aumentar o reducir la cantidad de radiación emitida por un cierto volumen de materia. Hemos mencionado ya estos tres procesos: la emisión espontánea, la emisión estimulada y la absorción. Los coeficientes, conocidos por el nombre de coeficiente de Einstein, representan en cierto modo la «intensidad» con la cual se produce cada uno de tales procesos o, en un lenguaje más preciso, la tasa de cada uno de ellos. Los valores de dichos coeficientes no son iguales para todos los átomos ni para todos los cambios de estado de un átomo dado, y su cálculo compete a la física atómica. Pero estos tres coeficientes obedecen también a una ley general válida cualquiera que sea el átomo y el cambio de estado: mientras que los coeficientes de emisión estimulada y de absorción no dependen explícitamente de la longitud de onda de la radiación, el coeficiente de emisión espontánea es inversamente proporcional al cubo de la longitud de onda. Cuando ésta disminuye, por ejemplo, en un factor 10, aquél aumenta en un factor 1000. Como que la tasa de emisión espontánea también aumenta rápidamente, parece imposible lograr una fuente en la que la emisión estimulada sea preponderante para longitudes de onda pequeñas. Es decir, el láser de rayos X es imposible. La ausencia de espejos para la realización de cavidades capaces de aumentar la amplificación no contribuye a mejorar las cosas.

En realidad no es posible limitarse al argumento precedente, pues emite otro factor determinante en la evolución de la tasa de radiación de un medio material. Como hemos visto, hay que tener en cuenta no sólo los coeficientes de Einstein, sino también la distribución de las poblaciones del medio entre los distintos estados excitados posibles de los átomos. Se observa entonces que si se efectúa una inversión de población entre dos estados excitados cuya diferencia de energías corresponde a los rayos X, es perfectamente posible que la emisión estimulada sea preponderante y que el medio constituya un amplificador de rayos X. Así pues, la verdadera cuestión es la siguiente: ¿es posible o no crear la inversión de población necesaria para la producción de una emisión láser de rayos X? Lo cierto es que durante mucho tiempo no se ha sabido cómo lograrlo; ni siquiera se ha sabido con qué material intentarlo. Para comprender el porqué veamos de qué modo podría aplicarse a los rayos X la técnica del bombeo óptica descrita anteriormente. La dificultad esencial estriba en que la vida media de los estados excitados que hay que bombear es muy corta. En este consiste, por lo demás, el auténtico significado del aumento de la tasa de emisión espontánea para las longitudes de onda cortas. En el caso de un átomo de neón, por ejemplo, y para una emisión en el campo visible, el estado superior de la transición se mantiene durante unos cincuenta nanosegundos antes de que se produzca la transición hacia el estado inferior. Para transiciones que emiten rayos X, el estado superior sólo se mantiene unos cuantos segundos e incluso mucho menos, es decir, miles de veces menos tiempo que en la zona visible. Intentar realizar inversiones con tales transiciones es la misma que querer llenar de tierra un depósito sin fondo o con un fondo en el que hay un gran agujero; para lograrlo, hay que manejar la pala a una velocidad tal que la cantidad de tierra que llega al depósito sea superior a la que escapa por el fondo. Ello significa que para realizar el bombeo óptico de un láser de rayos X hace falta una potencia de bombeo miles de veces mayor que la que requiere un láser ordinario. Pero incluso en el caso de que supiéramos producir una potencia como la descrita y estuviéramos dispuestos a pagar su precio ¿qué ocurriría? La radiación de bombeo necesaria es tan intensa que volatilizaría y destruiría completamente el cuerpo que deseamos bombear. Y nos volveríamos a quedar sin láser de rayos X.

Todo ello explica la lentitud de los progresos en las investigaciones iniciadas sobre el tema hace unos quince



años, y las vacilaciones al respecto de buena parte de la comunidad científica. Pero la situación se está modificando rápidamente; la realización de un láser de rayos X, al menos en el campo de los rayos X «blandos» de la región comprendida entre 100 y 200 angströms de longitud de onda, no se contempla ya como objetivo inaccesible. Varios experimentos, en efecto, han puesto de manifiesto la posibilidad de amplificar la radiación X por emisión estimulada. ¿Qué ha cambiado, pues?

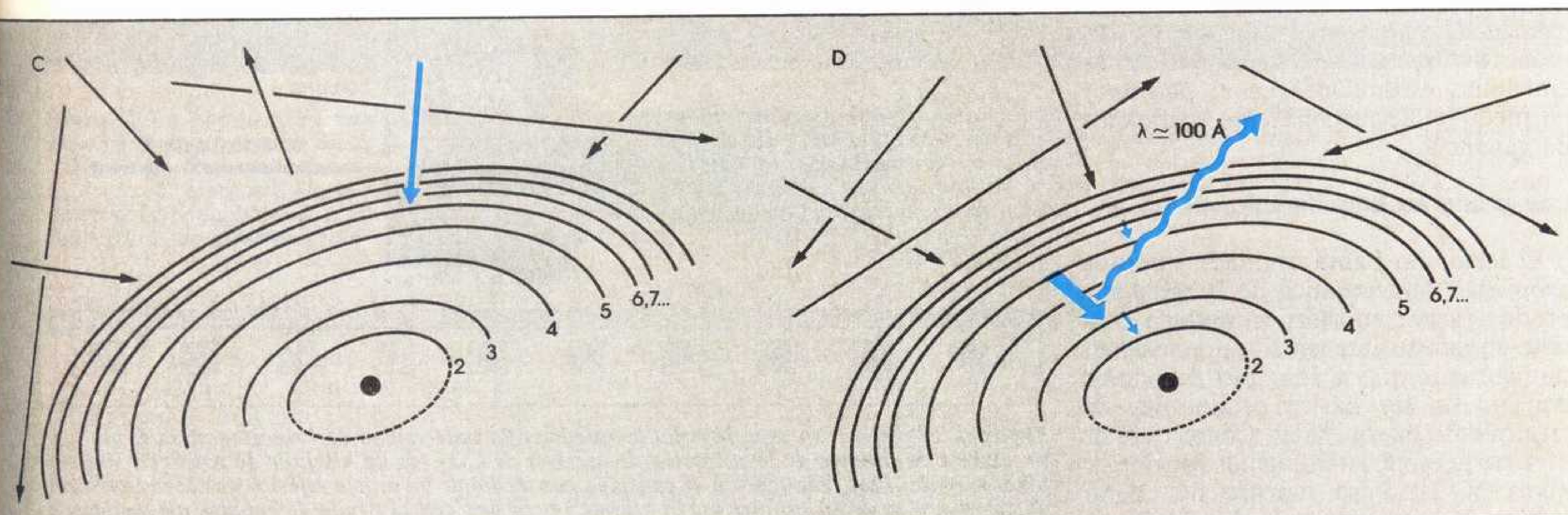
De hecho, todos los experimentos dimanan de centros científicos en los que se realizan investigaciones sobre la fusión termonuclear controlada. Aparentemente, este campo parece no guardar relación con el problema de los láseres de rayos X. No obstante, esta relación existe: ello es debido a que la fusión termonuclear implica la realización de temperaturas extremadamente grandes en la materia. Las investigaciones en torno a la fusión conducen pues al estudio a gran escala de las propiedades físicas de lo que a veces se conoce como cuarto estado de la materia, es decir, de los plasmas. Cuando la materia se calienta hasta centenares de miles de grados, e incluso varios millones de grados, los átomos que la constituyen son sometidos a una agitación tal que una parte, a veces incluso la totalidad, de los electrones que gravitan alrededor de los núcleos se separan de ellos. Se obtiene entonces un medio compuesto, no de átomos como en un gas ordinario, sino de iones multicargados, es decir de átomos que han perdido varios electrones; en tal caso, los iones quedan rodeados por un denso gas de electrones libres. Este medio es lo que se conoce como plasma.

Con miras a la solución del problema que nos ocupa, los plasmas calientes, tal como aparecen en las investigaciones sobre la fusión termonuclear, presentan dos ventajas. Debido a su elevada temperatura, constituyen naturalmente una fuente de emisión intensa en el ultravioleta y en los rayos X. De otra parte, la manera de producirlos, por ejemplo con la ayuda de láseres de gran potencia que operan en el visible o en el infrarrojo, los convierten en medios favorables para la aparición «espontánea» de desviaciones muy grandes del equilibrio. Ello resulta sobre todo de su muy rápido calentamiento y enfriamiento, que no da tiempo a que el equilibrio se establezca para todos los componentes del plasma. Entonces, la distribución de las poblaciones entre los estados excitados de los iones multicargados, en vez de ser puramente estadística –como ocurre, ya lo hemos visto, en las fuentes de luz ordinarias– presenta anomalías. Algunos estados se encuentran más poblados de lo que estarían en el equilibrio y otros menos. Si concurren circunstancias favorables, estas anomalías pueden convertirse en auténticas inversiones de poblaciones. Así pues, lo que hace que los plasmas producidos por láser sean tan atractivos para la realización de un láser X es el hecho de permitir la producción de inversiones de población mediante un ahorro de bombeo óptico, tan difícil de conseguir en el caso de los rayos X. (fig. 3)

Estas ideas aparentemente simples se impusieron con cierta dificultad, y los primeros trabajos efectuados en este sentido, en particular los de mi laboratorio, chocaron al principio con un gran escepticismo. La desafortunada prisa de un investigador de Utah (Estados Unidos), que en 1972 creyó poder anunciar la observación de una emisión láser de rayos X en condiciones muy mal definidas, no hizo más que agravar estas dudas en una época en la que, de todos modos, las técnicas experimentales adolecían todavía de muchas imperfecciones y permitían un margen de error apreciable en los resultados de los escasos grupos de investigación que habían iniciado trabajos en este campo.

En lo que a nosotros concierne, en 1971 nos había llevado hacia la pista de la observación de inversiones de poblaciones el problema planteado por la interpretación de una anomalía muy fuerte de intensidad que aparecía en una raya espectral, en una longitud de onda de 117,4 angströms, en un plasma de aluminio. Previamente, por razones que rebasan el marco del presente artículo, habíamos puesto a punto una técnica experimental destinada a medir las tasas de absorción en los plasmas. Al utilizarla para la raya 117,4 angströms del aluminio ionizado, sólo podíamos hacer corresponder los valores hallados para la absorción y la emisión suponiendo que el nivel superior de la transición estaba anormalmente superpoblado.[1] De hecho, el método utilizado es el precursor del que hoy se ha generalizado para la medida de coeficientes de amplificación en rayos X. Pero durante mucho tiempo fuimos los únicos en utilizarlo. Otros trabajos efectuados algo más tarde, en particular los de F.E. Irons y N.J. Peacock en 1974 en Gran

Figura 5. Un plasma es un medio formado por iones multicargados (átomos que han perdido varios electrones) y electrones libres. En el experimento de Livermore, se utilizan iones «neonoides» de selenio, es decir, átomos que han perdido 24 electrones (transformados en electrones libres) y conservan 10 (como en un átomo de neón). Estos iones pueden encontrarse en distintos niveles de excitación. Las flechas verdes representan la trayectoria de electrones libres que, por colisión, pueden hacer pasar los iones del estado fundamental $2p^6$ (seis electrones en la capa 2p) al nivel $2p^5$ 3p, (un electrón en la capa 3d) que es el más excitado (A). La desexcitación se produce preferentemente hacia el nivel $2p^5$ 3p, de tal manera que en el plasma aparecen más iones en el estado 3p que en el estado 3s. Esta inversión de población hace que el plasma se vuelva amplificador para la transición 3s-3p, que corresponde a una emisión de 200 angströms de longitud de onda (B). En los trabajos que se llevan a cabo en Princeton (Estados Unidos), en el laboratorio Rutherford (Inglaterra) y en Palaiseau (Francia) interviene un mecanismo distinto. Cuando el plasma se enfría (algunos nanosegundos después del disparo del láser), el gas de electrones se «condensa» por recombinación con los iones multicargados (C). Los niveles superiores (n = 5, 6, 7...) se pueblan entonces más deprisa que los inferiores (n = 2, 3). En Palaiseau se utilizan iones litioides de aluminio, átomos que han perdido 10 electrones y han conservado 3. La inversión de población que tiene lugar entre los niveles n = 5 y n = 3 hace que el plasma se vuelva amplificador para una transición que corresponde a una emisión de unos 100 angströms de longitud de onda (D).



(1) P. Jaeglé *et al. Physics Letters, 36 A*, 30, 1971.

Los éxitos obtenidos a partir de 1984 han barrido las dudas y las vacilaciones.

Bretaña, confirmaron la existencia de estas inversiones de población.[2] Más tarde se llevaron a cabo trabajos análogos en Estados Unidos,[3] a la vez que aparecían las primeras tentativas para explicar la producción de las inversiones de poblaciones por medio de un cálculo completo que tenía en cuenta todas las propiedades importantes del plasma y de los átomos ionizados. La de Geoffrey J. Pert de la universidad de Hull (Gran Bretaña), en 1976, fue una de las más señaladas.[4] Combinando por primera vez un cálculo hidrodinámico de la evolución del plasma con un cálculo atómico de la población de los iones hidrogenoides, desembocaba en las inversiones observadas dos años antes por Irons y Peacock y demostraba que las provocaba el enfriamiento rápido del plasma durante su expansión. Por último, hacia la misma época, un grupo de teóricos soviéticos se anticipaba a los experimentos ulteriores al prever un nuevo tipo de inversiones que no fueron observadas hasta nueve años después.[5]

En estos últimos años, el desarrollo de las técnicas ha permitido, en efecto, abordar una nueva fase en la realización del láser de rayos X. Examinemos pues rápidamente el principio en el que se basan los recientes experimentos, que han tenido un amplio eco en el mundo científico. Su objetivo consiste en demostrar directamente la existencia de emisiones estimuladas en el plasma y en medir el correspondiente coeficiente de ganancia.

Las primeras amplificaciones

El lector no habrá olvidado que una propiedad característica de la radiación producida por emisión estimulada consiste en que su intensidad aumenta más rápidamente que la longitud del medio emisor. La ley básica es una ley de crecimiento exponencial. Como que, de otra parte, no existen buenos espejos de rayos X, la única manera de operar estriba en hacer variar la dimensión de un plasma caliente en la dirección de un detector para estudiar la evolución de la intensidad de la radiación X en función de la longitud del plasma. Se fabrica entonces una columna de plasma –por ejemplo, focalizando sobre un blanco el haz de un láser muy potente por medio de una lente cilíndrica– y se estudia la radiación X emitida en la dirección del eje de la columna. Si la intensidad de la radiación observada crece exponencialmente en función de la longitud de la columna, queda demostrado que esta radiación es debida a una emisión estimulada. Si, por contra, crece menos deprisa que la longitud o no crece en absoluto, se está ante una emisión espontánea. No detallaré aquí las dificultades que hay que superar para producir columnas de plasma de geometría bien definida y longitud variable. En el estadio actual de la técnica, el valor máximo de esta longitud apenas rebasa los 2 centímetros.

Este tipo de experimentos fue llevado a cabo con éxito en 1984 en el laboratorio de Livermore (Estados Unidos) por el equipo de investigadores dirigido por Dennis Mattohews. Se calentó un plasma de selenio hasta una temperatura de 8 millones de grados mediante el láser que actualmente es el más potente del mundo, el láser NOVA, cada uno de cuyos diez haces (en el experimento de láser X se utilizan solamente dos) es capaz de suministrar una potencia de diez billones de watios. (fig. 4) Los investigadores de Livermore demostraron con toda claridad el aumento exponencial de la intensidad de dos rayas espectrales situadas respectivamente a 206 y 209 angströms. Estas rayas son emitidas por iones de selenio en los que sólo quedan diez de los treinta y cuatro electrones que posee el átomo neutro. Estos iones se llaman neonoideos debido a la analogía entre su estructura electrónica y la de los átomos de neón neutro. El coeficiente de ganancia medido en Livermore es de aproximadamente 5 por centímetro, un valor notablemente elevado.[6]

Para explicar estos resultados, el equipo norteamericano recurre a un mecanismo, llamado de «bombeo colisional», cuyo fundamento es el que previeron unos investigadores soviéticos unos años antes.[5] Este mecanismo es específico de los iones de tipo neonoide o de estructura análoga. Dichos iones presentan una serie de estados excitados (estados 3d, 3p, 3s por encima del estado fundamental 2p) de características propicias para la aparición de una inversión de población. El nivel 3d, el de energía más alta, posee en efecto una gran probabilidad de poblarse por efecto de colisiones entre los iones y los electrones libres del plasma. Los iones que de este modo pasan al estado 3d pueden desexcitarse luego hacia el nivel 3p por cascadas radiactivas espontáneas y por colisiones con los electrones libres. Las transiciones hacia el nivel 3s son menos numerosas debido a las «reglas de selección» que prohíben ciertos procesos. Como que, de otra parte, la transición 3s-2p se efectúa mucho más fácilmente, el nivel 3s se vacía mucho más rápidamente que el 3p, y la inversión de población aparece entre estos dos últimos. La ventaja de tal mecanismo consiste en la posibilidad teórica de producir de un modo continuo la inversión de poblaciones buscada. Pero, para lograrlo, la temperatura y la densidad del plasma tienen que situarse en un estrecho margen de valores. (fig. 5A).

Es un mecanismo distinto el que interviene en los trabajos realizados simultáneamente en la universidad de Princeton (Estados Unidos), en el laboratorio Rutherford (Inglaterra) y en mi laboratorio de la universidad Paris-Sud, laboratorio asociado al GRECO (Interacción Láser-Materia) de Palaiseau. (fig. 5B). En los trabajos en cuestión, las inversiones de población se producen durante el enfriamiento y la recombinación del plasma. Por impacto de un haz láser en el blanco (colocado en el vacío), se produce un plasma con una temperatura de, digamos, un millón de grados. La irradiación del blanco dura muy poco tiempo; después de algunos nanosegundos, el disparo del haz láser queda interrumpido y el plasma es

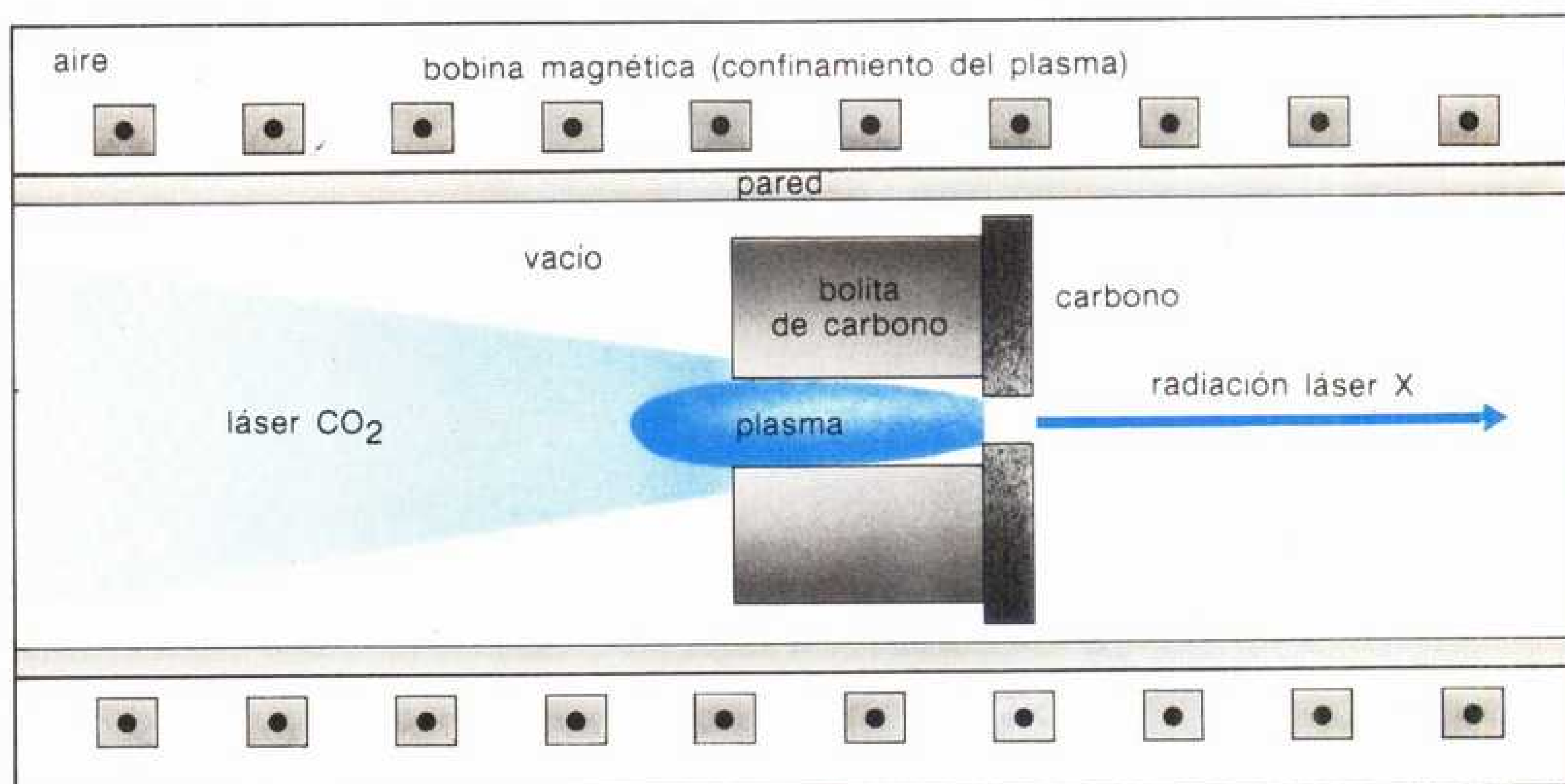


Figura 6. El dispositivo experimental instalado en la universidad de Princeton permite producir un plasma de carbono de focalización de un láser de CO_2 (de un kilojulio de potencia) sobre un blanco sólido. Esta focalización se consigue por medio de un espejo esférico de cobre cuyo radio de curvatura es de 4 centímetros. El plasma se confina con la ayuda de bobinas magnéticas, de tal modo que conserve una densidad elevada durante su enfriamiento. La inversión de población se produce entre los niveles $n = 2$ y $n = 3$ de los iones hidrogenoides de carbono. La transición correspondiente engendra una emisión a 182 angstrôms de longitud de onda. La radiación amplificada por emisión estimulada se mide en la dirección del eje del plasma. En la dirección opuesta se coloca un pequeño espejo que para dicha longitud de onda es reflector. Dicho espejo incrementa el valor de la ganancia al multiplicar por dos la longitud del recorrido de los fotones en el plasma. Con este dispositivo se han obtenido valores superiores a 6 del producto de la ganancia por la longitud.

(2) F.E. Irons, N.J Peacock, *J. Phys. B, 7,* 1109, 1974.
(3) R.H. Dixon, R.C. Elton, *Phys. Rev. Letters, 38,* 1072, 1977; V.A. Bhagavatula, B. Yaakabi, *Optics Communications, 24,* 331, 1978.
(4) G.J. Pert, *J. Phys. B, 9,* 3301, 1976.
(5) A.V. Vinogradov *et al., J. Quant. Electron., 5,* 525, 1976.

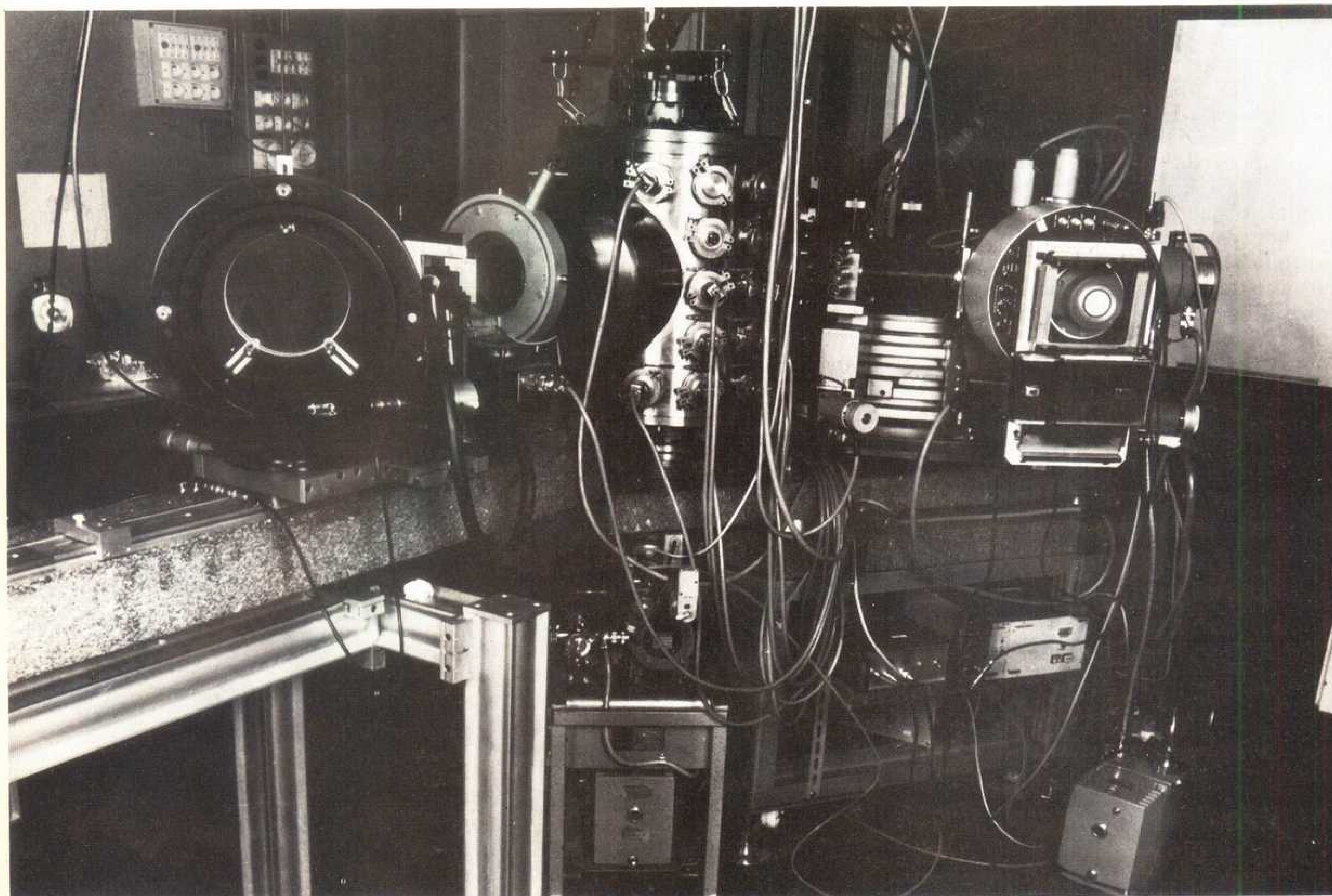


Figura 7. En Palaiseau (Francia), el equipo de investigdores que trabajan bajo la dirección de Pierre Jaeglé han observado una amplificación láser a 105 angströms, es decir, para rayos X de longitud de onda dos veces más corta que en el experimento norteamericano de Livermore. En el centro de la foto se distingue la cámara experimental en la que se crea el plasma de aluminio. La radiación láser que lo crea llega por la izquierda. El espectrógrafo que analiza los rayos X se despliega hacia la derecha, donde se ve una cámara de «barrido de rendija» que permite registrar la evolución con el tiempo de la radiación X del plasma con una resolución de algunas decenas de picosegundos. (Foto B. Chauveau, Laboratorio de espectroscopía atómica e iónica de Orsay.)

abandonado a sí mismo. Al no ser frenado por ningún obstáculo, puesto que el blanco está en el vacío, el plasma se dilata rápidamente, como cualquier gas bruscamente liberado. La evolución subsiguiente puede compararse a la que produce la rotura de la contención de un embalse regulador en el valle de un río. Una fotografía de las aguas precipitándose río abajo constituiría una excelente representación de lo que hemos llamado una «situación fuera del equilibrio». Al principio, la mayor parte de agua todavía está en la parte alta del valle, en el embalse, y hace falta un tiempo más o menos largo para que toda el agua fluya hacia abajo y se restablezca el equilibrio. La parte alta del valle representa el plasma muy caliente y sus iones fuertemente cargados, en particular los niveles fuertemente excitados de estos iones. La parte baja del valle es el plasma dilatado y enfriado, con unos iones débilmente cargados, e incluso átomos neutros, en un estado próximo al fundamental. El enfriamiento del plasma, se da junto con una recombinación de los iones multicargados con los electrones libres, que reduce el grado de carga de los iones. El agua que fluye del río abajo es el gas de electrones libres que se precipita hacia los iones multicargados para recombinarse con ellos. Se comprende entonces que niveles fuertemente excitados, situados «río arriba», puedan poblarse más rápidamente, debido a la recombinación del plasma, que niveles menos excitados situados «río abajo». Tal es el origen de la inversión de población que nos interesa.

En los experimentos llevados a cabo en Princeton por el equipo de Szimon Suckewer se empieza por ionizar totalmente el plasma de carbono, provocando así la recombinación de los núcleos desnudos de carbono (fig. 6). Es el caso que había estudiado G.J. Pert en sus primeros cálculos.[4] Desde el punto de vista teórico, tiene la ventaja de tratar con el producto de recombinación cuya estructura atómica es la más simple posible: un ion formado por un núcleo y un solo electrón, es decir, un ion de estructura hidrogenoide. Se demuestra bastante fácilmente que puede producirse una inversión de población entre los niveles de número cuántico principal n = 3 y n = 2, niveles a los que corresponde una transición de longitud de onda igual a 182 angströms. Para mejorar la eficacia de la recombinación, S. Suckewer tuvo la idea de confinar el plasma mediante un campo magnético, de tal modo que se mantuviera una fuerte densidad de plasma durante el enfriamiento.[7] En el dispositivo que ideó, el plasma, producido por el impacto de un haz láser de CO_2 en un blanco de carbono, se encuentra en el interior de unas bobinas magnéticas que engendran un campo de confinamiento de hasta 90 kilogauss. Los rayos X emitidos por la columna de plasma son analizados y detectados simultáneamente en dos direcciones perpendiculares: según el eje de la columna y en una dirección transversal. Sin entrar en los detalles de esta técnica un poco particular, digamos que el coeficiente de ganancias observado en estas condiciones por el grupo de Princeton es absolutamente comparable al indicado más arriba para el experimento de Livermore.

Por nuestra parte, trabajamos en los locales de la École Polytechnique de Palaiseau con iones de aluminio diez veces cargadas, es decir, que poseen todavía tres electrones, lo que corresponde a la estructura de los átomos de

(6) D.L., Matthews *et al., Phys. Rev. Letters, 54,* 110, 1985.

(7) S. Suckewer, H. Fishman, *J. Appl. Phys, 51,* 1922, 1980.

Un instrumento ideal para observar las células vivientes.

litio. El equipo que realiza estos experimentos y los correspondientes trabajos numéricos comprende a Gérard Jamelot, Annie Klisnick, Antoine Carillon, Alain Sureau, Hélène Guennou y Georges Tévanian.[8] Para el cálculo de las inversiones de población, el caso que hemos elegido es evidentemente más complejo que el precedente; no obstante, por esto mismo es más rico en posibilidades que explorar. Para producir una radiación amplificada de una longitud de onda dada, por ejemplo, los iones litioides son los que exigen la temperatura de plasma menos elevada; con un láser cien veces menos potente que el de Livermore, hemos observado una amplificación a 105 angströms, es decir, para rayos X de longitud de onda dos veces más corta que en el experimento norteamericano (fig. 7). Es verdad que el coeficiente de ganancia que obtenemos actualmente es de 1 a 2 por centímetro en vez de 5 ó 6 como en Livermore; ¡no se puede conseguir todo a la vez! Gracias a una cámara de «barrida de rendija» muy rápida, hemos conseguido estudiar la evolución temporal de la ganancia. Hemos observado que aparece de 6 a 7 nanosegundos después del impulso láser que crea el plasma, y que su duración no sobrepasa los 2 ó 3 segundos. Estos resultados han sido recientemente publicados en *Europhysics Letters*.[9] Constituyen un excelente argumento en favor del modelo de recombinación.

Pasar de un medio amplificador a un verdadero láser

¿Qué importancia cabe a estos distintos resultados en la ruta que lleva al láser de rayos X? Hay que decir ante todo que los trabajos mencionados, al hacer desaparecer las dudas que antes abrigaban numerosos físicos acerca del fundamento mismo de la obtención de emisiones estimuladas para los rayos X, han permitido un nuevo desarrollo de las investigaciones que no tardará en dar sus propios frutos. Pero la pregunta inevitable es la siguiente: ¿podemos pensar ya, sobre la sola base de los conocimientos actuales, en la realización de un láser de rayos X utilizable prácticamente?

Para responder de manera precisa a esta cuestión hay que examinar un poco más de cerca el problema del valor de la ganancia necesaria para realizar un láser. Cada uno de los experimentos descritos se caracteriza, como se ha visto, por el valor del coeficiente de ganancia que permite alcanzar actualmente. La «ganancia» propiamente dicha es el producto de este coeficiente por la longitud efectiva del medio amplificador. Es este producto el exponente de la función exponencial que determina la intensidad. Para un coeficiente de ganancia de 2 por centímetro y una columna de plasma de 2 centímetros de longitud, la ganancia vale 4 y la intensidad de la radiación queda multiplicada por un valor próximo a 7 cuando la longitud aumenta de 1 a 2 centímetros.

(8) G. Jamelot *et. al.*, *J. Phys. B, 18*, 4647, 1985.
(9) P. Jaeglé *et. al.*, *Europhys. Lett.*, *1*.555 1986.

Pero hay que ver con claridad que una ganancia de 2, lo mismo que una de 4 ó de 6, es insuficiente para realizar un verdadero láser. En efecto, la tendencia natural de los iones multicargados del plasma consiste en emitir sus fotones espontáneamente, de manera desordenada. Un poco de emisión estimulada, la que queda patente en la existencia de una pequeña ganancia, no basta para imponerles un ritmo único de emisión. Las cosas ocurren como si en un ballet la orquesta no tocara lo bastante fuerte para que la oyeran todos los bailarines y una parte de éstos no dieran con el ritmo correcto. Pero lo que caracteriza una emisión láser es precisamente la coherencia que se establece entre los emisores individuales. Esta coherencia sólo aparece si el número de fotones producidos por emisión estimulada es de un orden de magnitud comparable al del número de iones emisores. En el caso del láser de rayos X, el valor de la ganancia que hay que alcanzar para ello es bastante difícil de establecer con exactitud. Pero se puede afirmar con seguridad que debe ser netamente superior a 10 ó 15, es decir, casi el doble del valor obtenido hasta el momento. El problema planteado es, pues, el siguiente: por lo menos doblar el valor de la ganancia obtenida en las columnas del plasma. ¿Cómo conseguirlo? En los demás campos de longitud de onda, como el visible o el infrarrojo, la solución es bien conocida: son las cavidades ópticas las que transforman un medio amplificador en un verdadero láser al aumentar por reflexiones sucesivas la longitud del trayecto de la radiación en el medio. Por ello, estamos muy pendientes de los progresos de la óptica de rayos X que podrían desembocar en la realización de una cavidad. Los progresos efectuados estos últimos años en la realización de espejos interferenciales, formados por un apilamiento de capas muy delgadas de materias alternativas absorbentes y transparentes, suscitan muchas esperanzas (véase «La formación de imágenes con rayos X» en nuestro número de octubre 1986). Hay que recordar, además, que el coeficiente de reflexión alcanzada por tales espejos sólo es del 10 al 20 % para una radiación de una longitud de onda del orden de 100 angströms. No cabe, pues, esperar milagros.

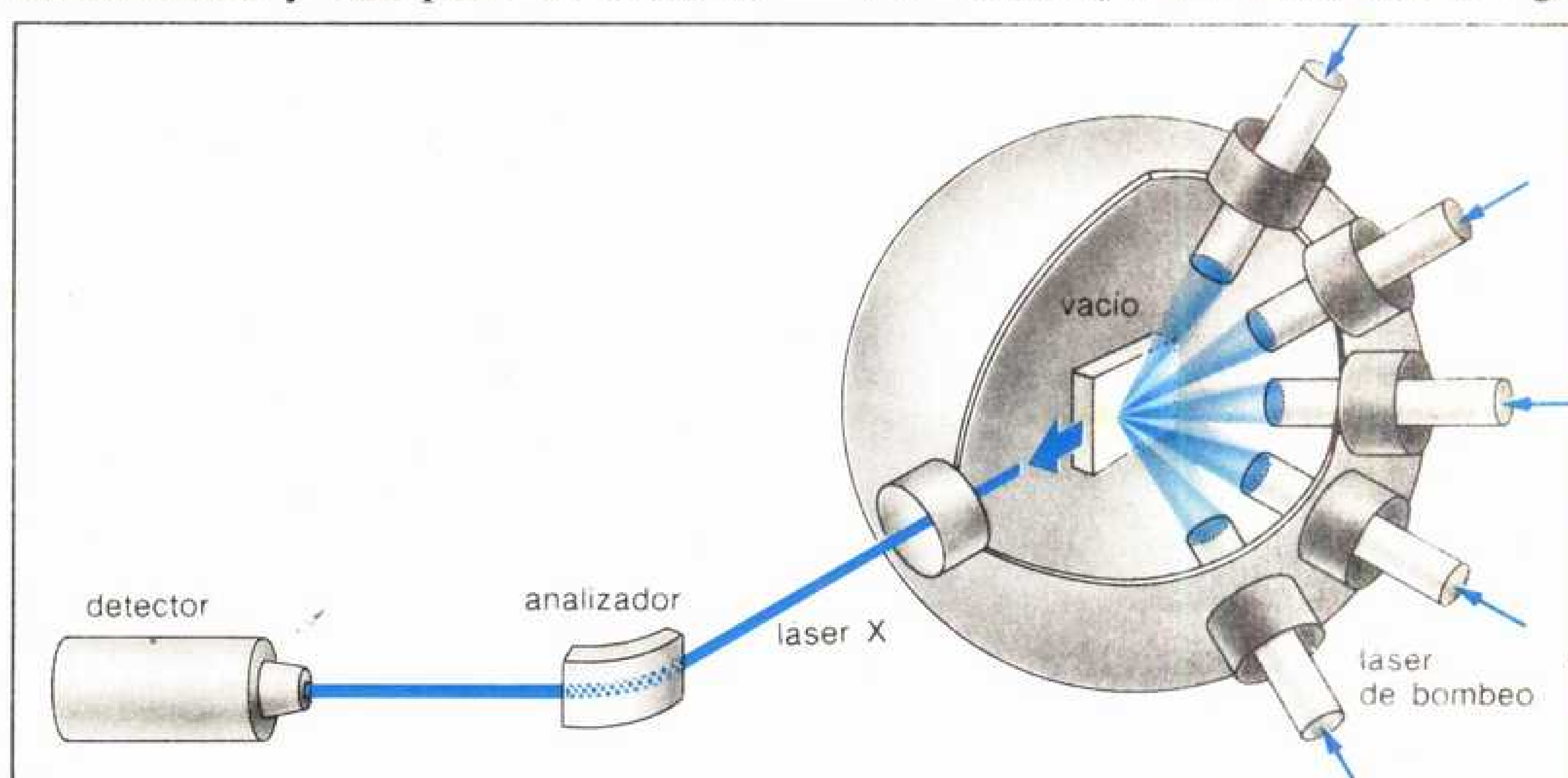


Figura 8. Las investigaciones llevadas a cabo hasta ahora en Palaiseau han permitido observar las primeras emisiones de luz láser a unos 100 angströms. Pero para obtener un verdadero láser que sea utilizable en la práctica hay que multiplicar por lo menos por un factor 5 el valor de la ganancia de amplificación obtenida en la columna de plasma. La manera más directa de lograrlo consiste en aumentar la longitud de dichas columnas. Ello supone que la potencia del láser utilizado para producir el plasma sea incrementada en la misma proporción. Los experimentos que actualmente se preparan en Palaiseau tienen por objeto aumentar de 2 a 6 cm la longitud de la columna de plasma amplificadora. Para ello se prevé la concentración en el blanco (en el centro de la cámara) de cinco haces láser. A la izquierda se representan muy esquemáticamente los dispositivos de análisis y de detección de la radiación de láser X emitida. El experimento debería de comenzar a fines de 1987.

Por fortuna, los coeficientes de ganancia obtenidos en los plasmas no son en absoluto pequeños comparados con los de los medios amplificadores habituales. Son incluso considerablemente superiores al coeficiente de ganancia del «láser de electrones libres». Este último utiliza como medio amplificador un haz de electrones acelerados y no un plasma. En teoría, su principio de funcionamiento puede permitir el acceso al campo de las longitudes de onda cortas. Pero al estar caracterizado por coeficientes de ganancia muy pequeños (de 10^{-3} a 10^{-4} en el vacío) sólo puede funcionar con una cavidad formada por espejos de muy alta calidad. Un coeficiente de ganancia de 2 por centímetro y una columna de plasma de 10 centímetros, en cambio prácticamente nos garantizarían un plasma de rayos X, incluso sin cavidad óptica. Así pues, el aumento de la longitud de onda de las columnas del plasma amplificador está al orden del día en los programas de investigación. Este aumento supone que la potencia del láser utilizado para pro-

ducir el plasma se incremente en la misma proporción a fin de que el aumento del volumen del plasma no desemboque en una reducción de su temperatura. Como que el cambio de volumen del plasma puede modificar algunas de sus propiedades físicas, estos programas exigen proceder por etapas. A principios de 1987 ya se dispondrá en Livermore de columnas de plasma de 5 centímetros de longitud. En Orsay se alcanzará una longitud similar unos meses más tarde.

Unas perspectivas apasionantes

¿Cuáles serían las aplicaciones de un láser de 100 a 200 angströms de longitud de onda, láser cuya realización parece ya tan cercana? Como ya he señalado, el punto importante es la escasa capacidad de penetración de dicha radiación. Un haz de rayos X tan «blandos» como éstos pierde generalmente el 99 % de su intensidad en menos de una micra de grosor de materia atravesada. No puede servir de sonda con materiales de grosor apreciable. Aunque quedan así descartadas algunas aplicaciones, otras resultan favorecidas. Al ser esta radiación poco destructora, se puede pensar en utilizarla para estudiar las células vivas. Éstas podrían disponerse, por ejemplo, en una lámina muy fina de agua, entre dos paredes también muy delgadas. El láser X serviría para hacer hologramas de esta preparación, que darían lugar a fotografías en relieve. ¿No es seductora la perspectiva de filmar en relieve las manifestaciones más íntimas de la vida celular con una resolución del orden de 100 angströms?

Mientras tanto, este láser será probablemente un excelente instrumento de trabajo en numerosos campos. Parece particularmente bien adaptado al estudio de ciertas propiedades fisicoquímicas de las superficies. Sería excelente para estudiar la rugosidad de las superficies. Aplicadas a los tejidos vivientes, los estudios de superficie pueden ser útiles para investigar las enfermedades de la piel. Siempre con la ayuda de las técnicas holográficas, se podrá utilizar para fabricar estructuras periódicas muy compactas, como las redes ópticas de gran poder dispersor. Será también de utilidad para la física molecular, disciplina que busca fuentes intensas y breves para excitar edificios complejos, y estudiar la cinética de su desexcitación y disociación. Además, como siempre en tales casos, cuando el láser de rayos X sea de uso corriente surgirán nuevas aplicaciones en las que hoy nadie piensa.

Para acceder al campo de los rayos X «duros», con eventuales nuevas aplicaciones, habría que reducir la longitud de onda en un factor aproximadamente igual a cien. Es algo que está fuera del alcance de los medios actuales, tanto a corto plazo como a plazo medio, pese a que se realizan investigaciones teóricas sobre la posibilidad de obtener láseres de radiación gamma a partir de procesos nucleares.

¿Qué progresos son de esperar en este punto preciso en un futuro próximo? La respuesta está estrechamente ligada a la potencia de los medios disponibles para crear el plasma. Sólo tenemos en cuenta aquí los medios accesibles en laboratorio, eventualmente utilizados económicamente, y excluimos las explosiones nucleares, a veces invocadas en los programas de guerra del espacio como medios de conseguir el bombeo de láseres X. El precio que hay que pagar para reducir la longitud de onda es un aumento sustancial de la temperatura del plasma. Desde este punto de vista, hay diferencias importantes entre las perspectivas ofrecidas por las dos principales direcciones de investigación actuales. Los sistemas que recurren a la recombinación del plasma durante su enfriamiento, como los de Princeton o Palaiseau, presentan una clara ventaja sobre el bombeo ocasional de los iones neonoides: en ellos no sólo la temperatura del plasma es mucho más pequeña desde el principio, sino que la longitud de onda láser también decrece mucho más deprisa cuando aumenta la temperatura. Por lo que respecta al esquema que estudiamos en Orsay (el de los iones litioides), la sustitución de aluminio por hierro y el aumento de la temperatura del plasma es un factor 5 (un valor que seguiría siendo inferior al que ya ha sido alcanzado en Livermore) conducirían a un láser X de 20 angtröms de longitud de onda. No es descabellado esperar obtener una emisión láser de 20 angströms para dentro de algunos años. En cualquier caso, el camino que lleva a la realización de un láser X de 100 angströms de longitud de onda está abierto y bien abierto. ■

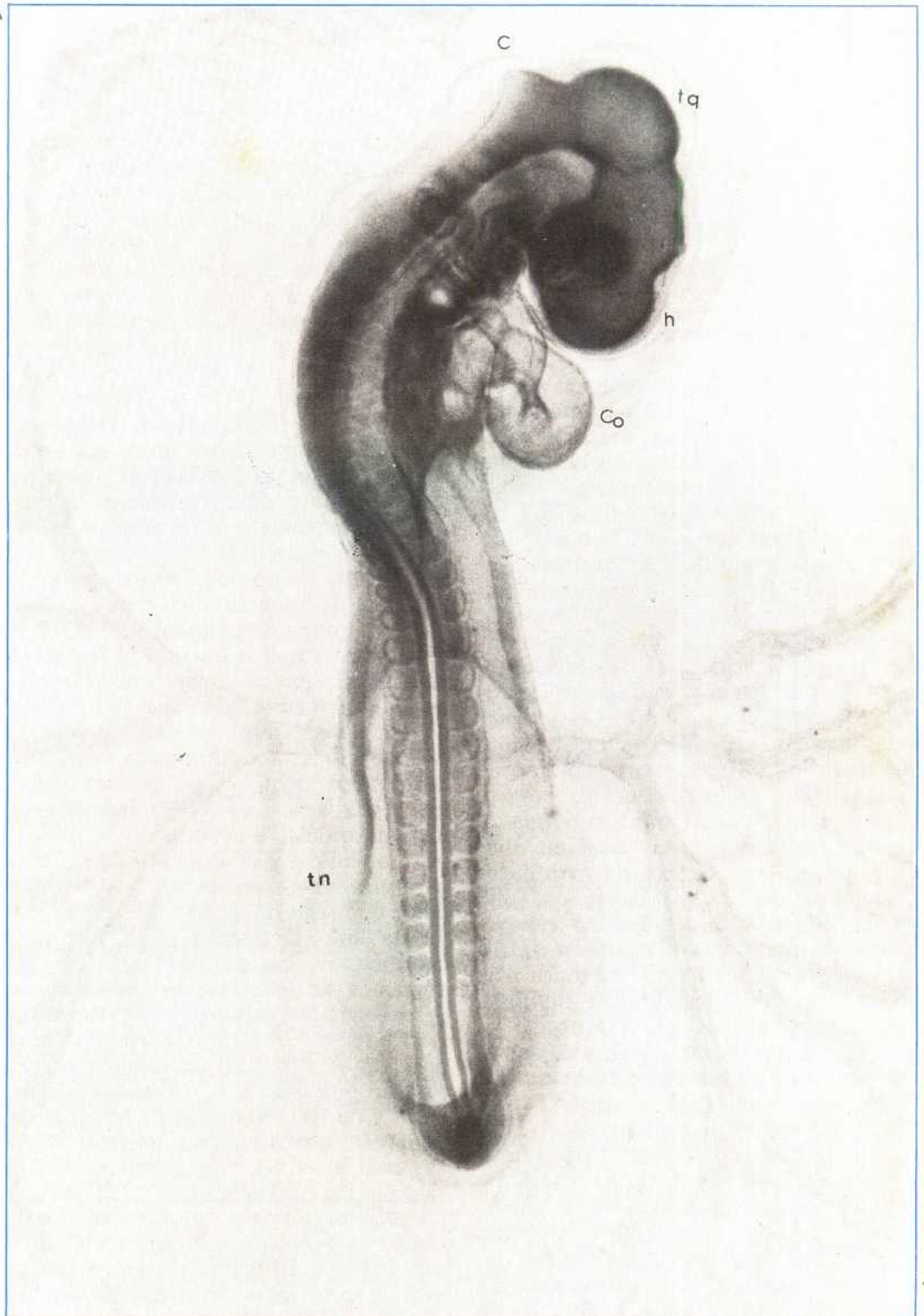
Para más información:

- P. Jaeglé (ed.), Actas del «International colloquium in X-ray lasers», Aussois, abril 1986», *J. Phys.*, *47*, supl. n.º 10, Col. C6-1986 publicado.
- R.R. Freeman, D.L. Matthews, «Feature edition en the generation of current X-UV and soft X-rays radiations», *J. Opt. Soc. Am. (B)*, a publicar 1987.
- S.E. Harris, T.B. Lucatorto, «Laser techniques in the extreme ultraviolet», *AIP Conf. Proc., n.º 119,* Nueva York, 1984.
- Para una bibliografía más completa véase la página 344.

El desarrollo

Una de las cuestiones más candentes planteadas a los biólogos modernos se refiere a la manera en que una masa de células embrionarias se transforma en el transcurso del desarrollo en esta estructura extremadamente compleja: el cerebro adulto. ¿Cómo se instalan, durante la vida embrionaria, las conexiones adecuadas entre las decenas de miles de millones de neuronas del cerebro? El siglo XIX y el comienzo del XX vieron la formulación de diversos tipos de soluciones a este problema. Pero no es sino hoy, merced al desarrollo de la biología celular y de la inmunoquímica, cuando tenemos los medios de verificar esta hipótesis. Colette Dehay y Henry Kennedy nos explican en este artículo las soluciones a las que han llegado las modernas investigaciones en neurobiología del desarrollo.

A

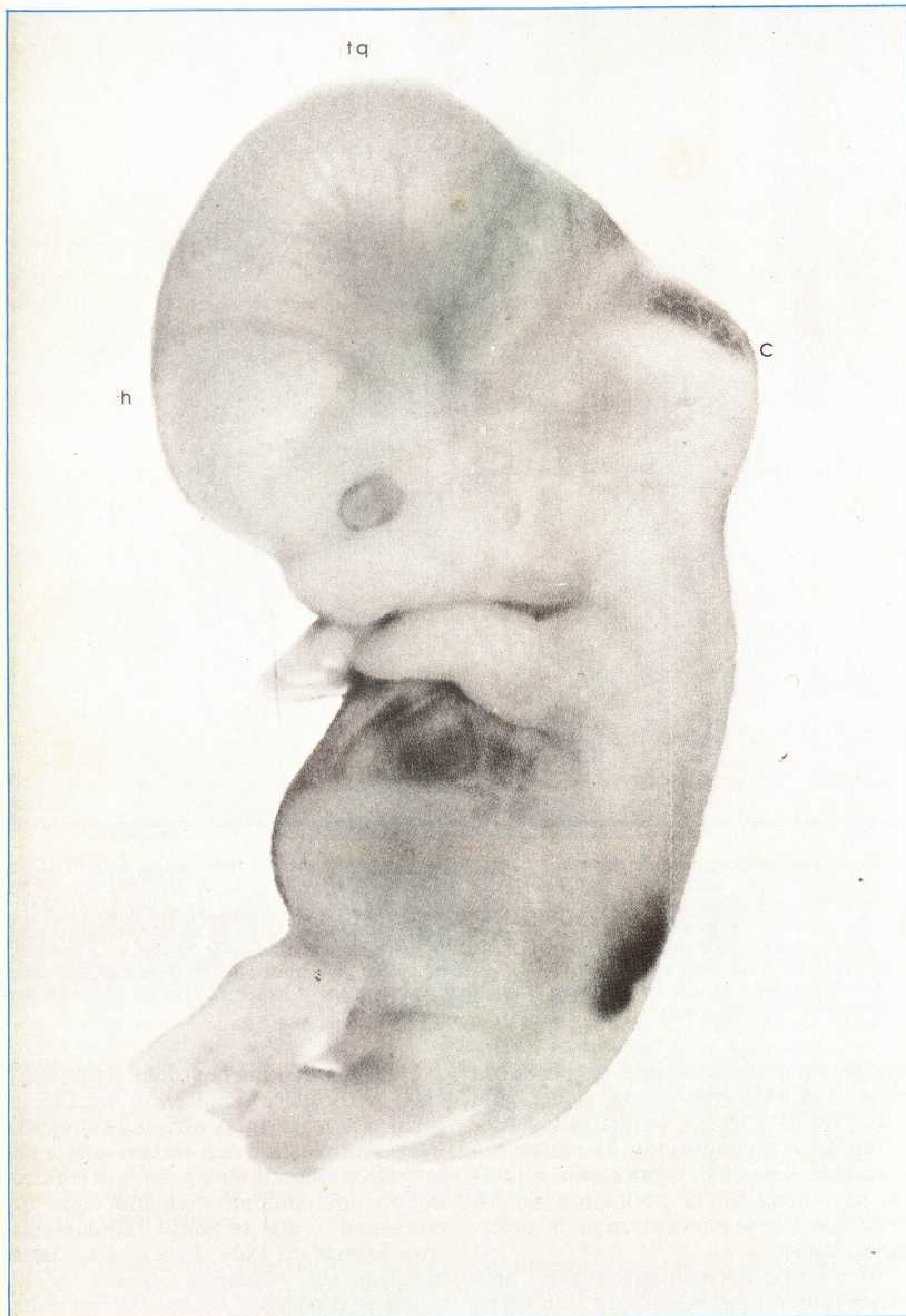


El cerebro es sin duda el órgano más fascinante de los seres vivos: ¿cómo permite al hombre pensar y tener conciencia? El neurobiólogo no puede responder aún a semejantes cuestiones. Se puede considerar el problema del funcionamiento del cerebro de forma algo mejor delimitada: permite a un ser vivo percibir el entorno, moverse en él y, con ello, proceder. Así pues, el cerebro tiene esencialmente una función de ajuste, de adaptación del organismo a las condiciones variables del medio. La realiza merced a la actividad coordinada de varios miles de millones de células nerviosas (o neuronas), conectadas unas con otras por medio de prolongaciones filiformes (dendritas y axones), algo así como los componentes de un ordenador que están unidos entre sí para formar los circuitos electrónicos. Esta comparación entre el ordenador y el cerebro resulta tentadora: desde hace mucho tiempo, los neurobiólogos han establecido que, efectivamente, hay unos circuitos neuronales en el cerebro gracias a los cuales las informaciones procedentes de los ojos, de los oídos, etc. son encaminadas, afinadas, tratadas, mezcladas, integradas, para salir de nuevo luego en forma de mensajes nerviosos que ordena a los músculos efectuar tal o cual operación.

Hoy, una buena parte de las investigaciones en neurobiología consiste en hacer inventario de esos circuitos, comprender su organización y su modo de funcionamiento. Es una tarea gigantesca, dado su número extraordinariamente elevado, sus intrincaciones, sus múltiples redundancias... Otra tarea de la neurobiología, quizá más difícil aún, estriba en comprender cómo se instala esta formidable «circuitería», en el transcurso del desarrollo del embrión. Los planos de construcción de los circuitos neuronales ¿se encuentran prede-

del cerebro

por Henry Kennedy y Colette Dehay



B *Figura 1. El desarrollo del cerebro en el embrión es un fenómeno capital, como atestigua el importante volumen que ocupa este órgano en el embrión de todos los vertebrados. En A, esta foto de embrión de pollo de 48 horas de edad (tras la fecundación) ilustra cómo comienza el desarrollo del sistema nervioso en prácticamente todos los vertebrados. En primer lugar aparece un tubo neural en la superficie dorsal del embrión, bien visible aquí en su extremidad caudal (t.n.). Mientras que la parte posterior mantendrá esta forma de tubo para dar la médula espinal, la parte anterior sufre diversos abultamientos que ulteriormente darán los hemisferios cerebrales (h.); los tubérculos cuadrigéminos (t.q.); y el cerebelo (c.). La gruesa protuberancia (co) debajo de la cabeza es el esbozo del corazón. En B, este embrión humano de 40 días de edad tras la fecundación muestra el enorme lugar que ocupa el cerebro en el transcurso del desarrollo en la especie humana. Se advierten las tres turgencias características de la superficie dorsal del cerebro: los hemisferios cerebrales (h.); los tubérculos cuadrigéminos (t.q.) y el cerebelo (c.). Se descubre también el tubo neural que corre a lo largo del dorso, por detrás del cerebro. En el hombre adulto, los hemisferios cerebrales han aumentado de tal modo de volumen que recubren todas las demás estructuras del cerebro. (Fotos A, autores. (LNPE); B, M.A.* **England,** *Wolfe, A Colour Atlas of Life Before Birth'.)*

terminados en el patrimonio genético? O, por el contrario ¿se construyen los circuitos mediante conexión establecida primero al azar y que se perfecciona después conforme a su funcionamiento? Estas cuestiones no han dejado de debatirse desde hace muchísimo tiempo, incluso desde la primera mitad del siglo xx. Los trabajos de estos últimos veinte años han permitido poco a poco aportar algunas respuestas, que vamos a examinar en este artículo. Muy recientemente, nuevos y sorprendentes datos han enriquecido este campo de investigación en neurobiología: resulta que la instalación de la enorme «circuitería» neuronal del cerebro no se produce solamente por adición continua de nuevas conexiones, sino también por unos fenómenos regresivos tales como muerte de neuronas o retracción de sus prolongaciones. Estos fenómenos acarrean la eliminación completa de esquemas enteros de conexiones. Finalmente, desde hace poco, los neurobiólogos empiezan a comprender que los complejos procesos de edificación de circuitos neuronales descansan en unos mecanismos de reconocimiento y de interacción entre las células. Y particularmente, han identificado ya algunas moléculas, llamadas «moléculas de adherencia celular neuronal» (o N-CAM), que desempeñan un papel clave en estos mecanismos. Dicho de otro modo, el estudio del desarrollo del cerebro ya no es sólo obra de embriólogos y anatomistas, sino que, como la mayoría de las disciplinas biológicas actuales, depende cada vez más de la biología celular e incluso molecular.

Las migraciones de las neuronas

Todo proceso de desarrollo consiste en la emergencia de una estructura organizada. Este proceso, la morfogénesis resulta principalmente, en el sistema nervioso, de la proliferación de las células seguida de su migración. El sistema nervioso aparece en los estadios precoces del desarrollo en forma de un simple tubo (tubo neural), que se extiende de delante hacia atrás en la superficie dorsal del embrión. En el transcurso del desarrollo, la parte posterior del tubo neural conservará su forma tubular primitiva y dará lugar a la médula espinal. Un proceso intenso de morfogénesis, que va a tener lugar en la parte anterior del tubo neural, desembocará en la formación del cerebro. Muy pronto se pueden distinguir las principales divisiones del cerebro (fig. 1) que resultan del engrosamiento diferencial de las paredes del tubo neural. Estas variaciones locales del grosor del tubo son consecuencia de una modulación regional de la intensidad de la proliferación celular en la zona del tubo neural que linda con el canal central (zona ventricular). Tras la división celular, las neuronas abandonan la zona ventricular y se desplazan en la pared del tubo hasta alcanzar

Henry Kennedy, director de investigación en el INSERM, ha trabajado en el laboratorio de fisiología de Oxford, luego en el laboratorio de neurofisiología de la facultad católica de Lovaina. Actualmente forma parte del equipo de investigación del sistema visual en el laboratorio de Marc Jeannerod en Bron (Ródano).
Colette Dehay, termina, en el mismo laboratorio, una tesis de doctorado acerca de las conexiones transitorias en el córtex en curso de desarrollo.

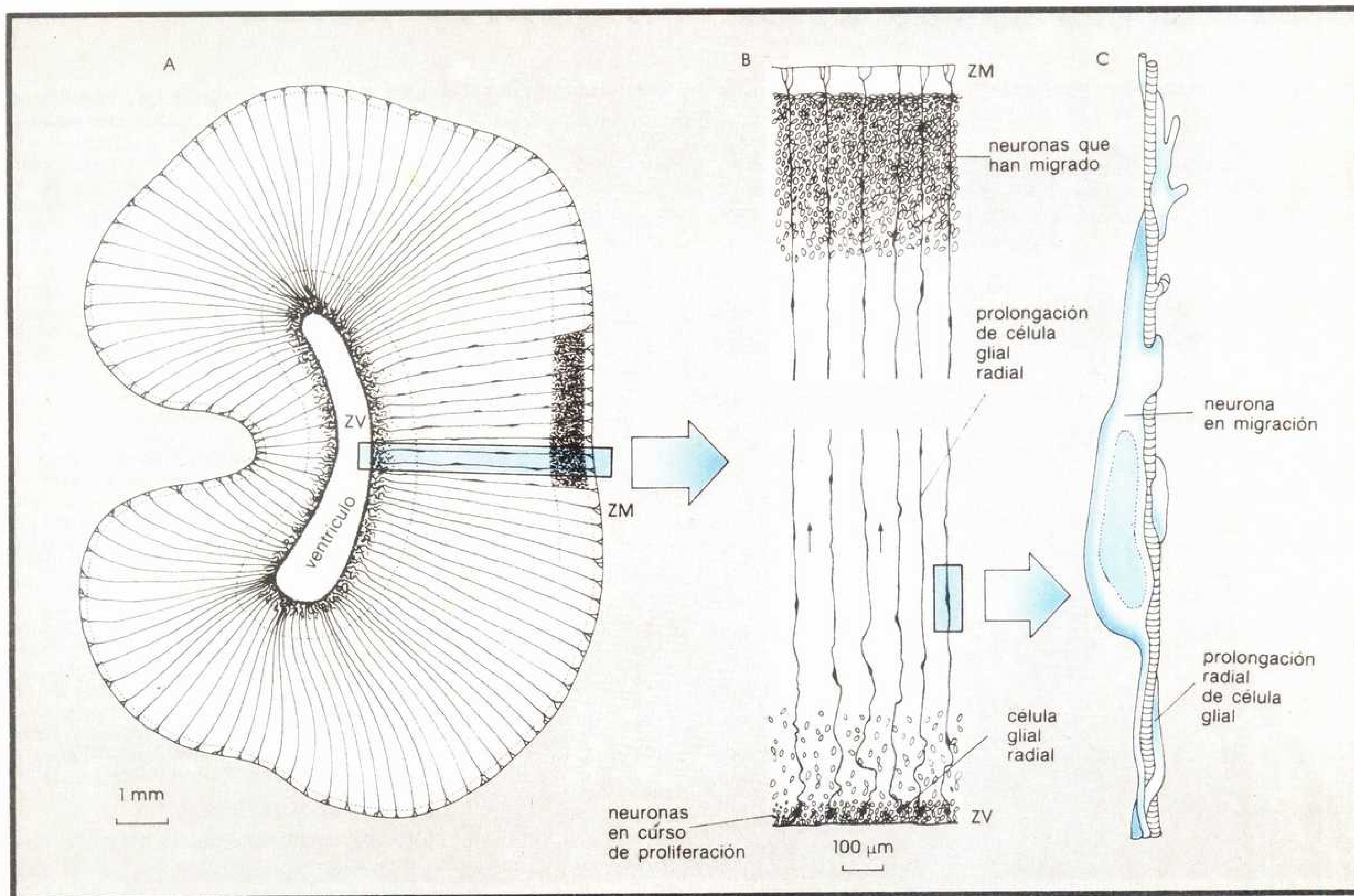


Figura 2. Al comienzo del desarrollo del sistema nervioso, unas migraciones de neuronas tienen lugar en las paredes del tubo neural primitivo. En este corte (A) del tubo neural de un embrión de mono (de 97 días), realizado al nivel posterior del cerebro, se ve la zona de proliferación de las neuronas, llamada zona ventricular (ZV). Las neuronas migran luego hasta cerca del borde externo del tubo neural (o zona marginal, ZM). Para conseguirlo se apoyan en las largas prolongaciones radiales de las células gliales. Éstas no tienen ningún cometido en la transmisión de los mensajes nerviosos, pero sirven de tejidos de sostén a las neuronas. En esta amplificación (B) de la zona encuadrada de la figura A se aprecian bien las células gliales, cuyos cuerpos celulares están situados en la zona ventricular (ZV), y cuyas largas prolongaciones se elevan radialmente hasta la zona marginal (ZM). La ampliación (C) de la zona encuadrada en la figura B muestra una neurona a punto de migrar, íntimamente adherida a la prolongación radial de la célula glial que le sirve de guía.

el borde externo (zona marginal) (fig. 2A). Conforme el aumento en volumen del tubo neural, la distancia que recorrer por las neuronas se hace cada vez más grande. ¿Cuál es el proceso de conducción que permite a estas generaciones sucesivas de neuronas alcanzar su posición final en el cerebro?

En los años 1970, P. Rakic, de la universidad de Yale en Estados Unidos, observó que las neuronas en migración eran guiadas por otras células presentes en las paredes del tubo neural.[1] Estas células llamadas células gliales no tienen en el cerebro adulto cometido alguno en la transmisión ni en el tratamiento de la información nerviosa, y constituyen un tejido de sostén. Una categoría particular de células gliales, las células gliales radiales, permiten que las neuronas migren en la pared del tubo neural (fig. 2B). Estas células, localizadas cerca del canal central, poseen largas prolongaciones que se proyectan radialmente para alcanzar el borde externo del tubo neural. Forman una especie de andamiaje sobre el que las neuronas en migración pueden desplazarse y progresar. Este proceso está asegurado gracias a unas interacciones que se producen entre una neurona y una célula glial dada. De esta forma, la glia radial proporciona una conducción de naturaleza mecánica (fig. 2C) e igualmente química, en virtud de la naturaleza de las proteínas que se encuentran en la superficie celular.

Al término de su migración, las neuronas toman unas posiciones bien determinadas en el seno de las estructuras cerebrales. Por ejemplo, en la parte superficial de los hemisferios cerebrales llamada el córtex, se encuentran seis capas de neuronas superpuestas. Gracias a marcaciones radiactivas, P. Rackic pudo demostrar que las neuronas formadas más antiguamente están localizadas en las capas más profundas. Olas sucesivas de neuronas ocuparán después unas posiciones cada vez más superficiales y, de esta forma, las neuronas más recientes estarán situadas en las capas más externas. Esto ilustra el hecho de que el momento de generación de una neurona determina con enorme precisión su posición final en el cerebro y, en consecuencia, el conjunto de sus futuras conexiones.

Una vez que las neuronas han alcanzado su posición final en el cerebro, o incluso a veces antes de que se inmovilicen completamente, emiten una prolongación portadora en su extremidad de un abultamiento llamado cono de crecimiento, que se alarga rápidamente para formar un axón. Éste crecerá hasta alcanzar sus neuronas ojetivo: así es como se establecen las conexiones entre neuronas. Los axones en crecimiento se reagrupan para formar haces y pueden recorrer grandes distancias en el cerebro antes de encontrar sus objetivos. Por ejemplo, las neuronas de la retina, llamadas neuronas ganglionares, reagrupan sus axones en un paquete de fibras que constituyen el nervio óptico. Los axones se prolongan hasta su primera parada: el «cuerpo geniculado lateral», que se encuentra situado debajo de los hemisferios cerebrales. Llegados allí, establecen conexiones con las neuronas localizadas en esta estructura. Éstas, por su parte, emiten durante el desarrollo embrionario, unos axones que discurren hasta alcanzar sus neuronas objetivo en las áreas visuales que están localizadas en la parte más posterior del cerebro.

(1) R. Rakic, *J. Comp. Neurol., 141,* 283, 1971.

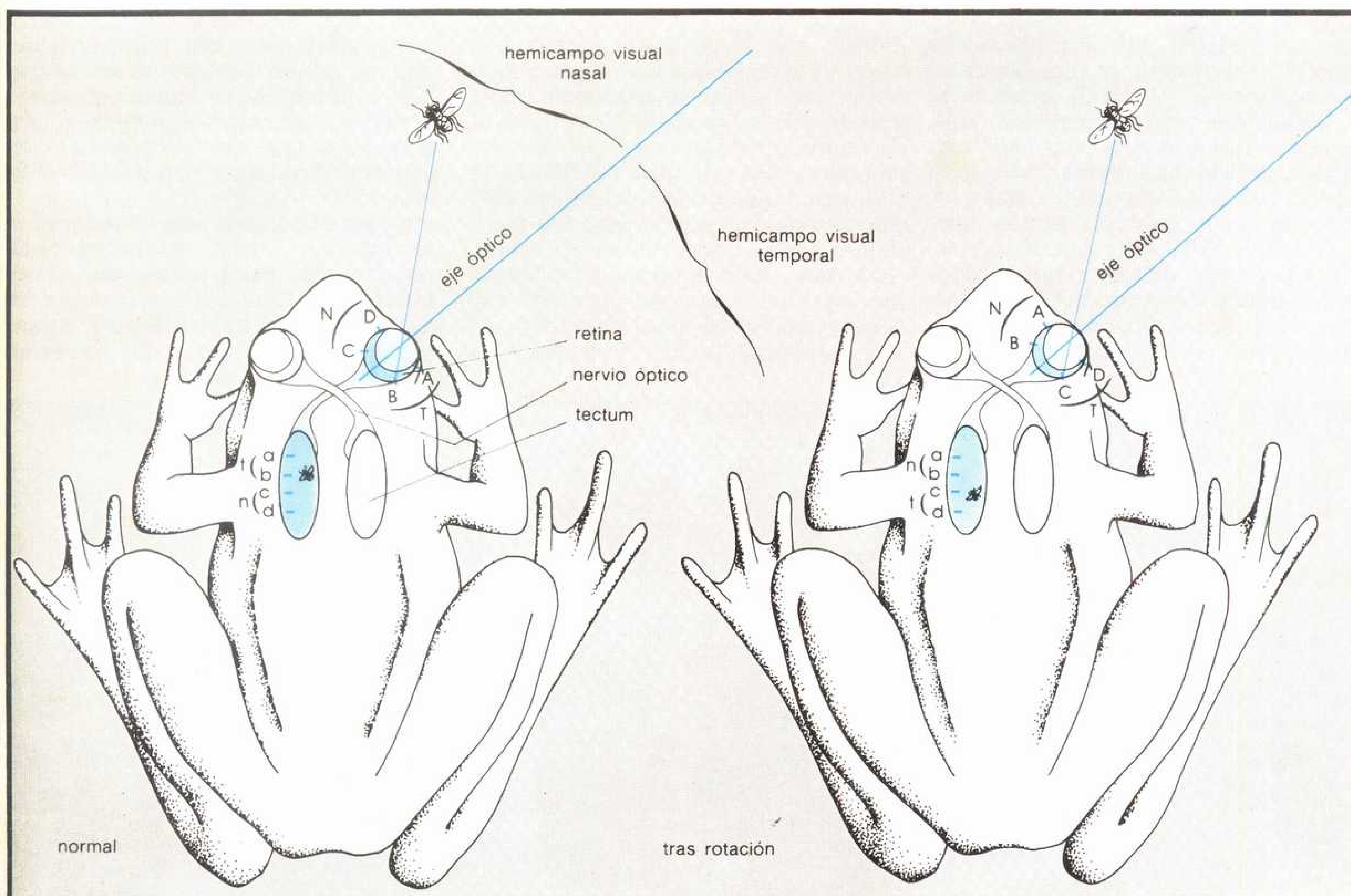


Figura 3. ¿Cómo se establece la «circuitería» neuronal en el transcurso del desarrollo? R. Sperry creía poder concluir por medio de ingeniosos experimentos que los axones «saben» la dirección de las neuronas con las cuales deben conectarse. Uno de estos experimentos consistía en seccionar los nervios ópticos y en hacer girar 180º los ojos de una rana en su órbita. En este caso, la visión se restauraría por restablecimiento de las conexiones entre las neuronas de la retina y las del tectum (área principal de proyección visual en la rana). Pero la percepción de las direcciones en el espacio en el animal así tratado se encontraba invertida: la rana ¡saltaba hacia atrás para atrapar moscas presentadas por delante! Según R. Sperry, la explicación era la siguiente. Simplificando, se puede admitir que cada neurona de la retina está conectada a una neurona dada del tectum: así, en el animal normal, las neuronas A, B, C, D de la retina emiten axones que desembocan en neuronas a, b, c, d del tectum. Llamamos hemirretina temporal la porción de retina situada (en relación al eje óptico del globo ocular) al lado de la sien (T) del animal, y hemirretina nasal, la porción de retina situada del lado nasal N. A nivel del tectum, las neuronas a y b reciben, pues, los mensajes suministrados por la hemirretina temporal; y las neuronas c y d reciben los mensajes proporcionados por la hemirretina nasal. En el animal tratado, si la neurona retiniana A recontacta la neurona tectal a, la neurona retiniana B la neurona tectal b, y así sucesivamente, las neuronas a y b corresponden en adelante a la hemirretina nasal, y las neuronas c y d a la hemirretina temporal. Dicho de otro modo, a nivel del tectum, los campos de recepción nasales (n) y temporales (t) están ahora invertidos, lo cual induce una percepción del espacio igualmente invertida. En efecto, el animal normal había aprendido a poner en correspondencia las neuronas situadas delante del tectum con el hemicampo visual nasal, y las situadas detrás con el hemicampo visual temporal. El animal tratado recibe la imagen de la mosca en las neuronas traseras del tectum, y en consecuencia la sitúa, en virtud de su aprendizaje anterior, en el hemicampo visual temporal. Consiguientemente, la rana se pone a saltar en dirección equivocada.

El proceso exacto que permite a los axones dirigirse hacia su objetivo en el cerebro constituye un problema fundamental y todavía muy mal comprendido de la neurobiología. Hasta los años 1930, la explicación más admitida era la del alemán P. Weiss: según esta teoría denominada funcionalista, las conexiones inicialmente establecidas entre neuronas estaban formadas en gran medida en forma aleatoria. Las neuronas objetivo de los axones en crecimiento habrían sido tocadas al azar. A partir de ese estadio inicial, que presenta un escaso grado de precisión en el circuito, la utilización repetida de los circuitos neuronales en el transcurso del funcionamiento del cerebro, en las situaciones reales de la vida cotidiana, habría seleccionado, reforzado y estabilizado la fracción de las conexiones que corresponden a los circuitos más apropiados. Sin embargo, en un trabajo de gran envergadura realizado entre 1938 y 1960, R. Sperry, que obtuvo el premio Nobel en 1981, pudo refutar esta teoría. Se basó especialmente en experiencias de regeneración del nervio óptico cortado y de restauración de la visión en la rana.

Efectivamente, en este animal, la visión puede ser totalmente restaurada tras sección del nervio óptico. Después de que se haya efectuado la lesión, los axones salidos de las neuronas ganglionares de la retina empiezan a crecer de manera desordenada. Y sin embargo, son capaces de restablecer un esquema de conexiones apropiado con sus neuronas objetivo: éstas forman su primer relé que en la rana se llama el tectum. R. Sperry postuló que los axones procedentes de la retina tienen la capacidad de reconocer sus neuronas objetivo. Lo probó por medio de unos ingeniosos experimentos: por ejemplo, hizo sufrir unas rotaciones de 180º a los ojos de las ranas en las que había practicado la sección del nervio óptico. Tras regeneración de los axones procedentes de la retina y restablecimiento de la visión, las ranas así tratadas presentaban unos comportamientos exactamente invertidos en relación a lo normal: por ejemplo, saltaban hacia atrás ¡para atrapar una mosca que se les ofrecía delante de ellas! Esto sólo podía explicarse si las neuronas ganglionares, a pesar de la rotación de 180º de la retina, habían restablecido sus conexiones con las mismas neuronas del tectum que antes de la lesión: lo cual supone en efecto, hacer girar 180º la representación del campo visual al nivel del tectum (véase figura 3).

Algunos experimentos de este tipo

sugieren, pues, que los axones en crecimiento en el transcurso del desarrollo (o en el transcurso de una regeneración) poseen, por decirlo así, la «dirección» de las neuronas con las que deben unirse. Según Sperry, habría unas moléculas en la superficie de las neuronas objetivo que constituirían un código químico, mientras que los axones poseerían también unas moléculas específicas complementarias en su superficie: ambos tipos de moléculas –las de las neuronas objetivo y las de los axones– presentarían una afinidad química selectiva. De este modo, cada conexión de los circuitos neuronales sería especificado por una codificación molecular.

La teoría de Sperry, llamada hipótesis de quimioafinidad, no parece hoy, sin embargo, totalmente exacta. En efecto, si se quita la mitad de la retina de una rana, las neuronas ganglionares de la mitad restante reinervan, no una mitad de tectum, sino la totalidad de éste. Por consiguiente, no es cierto que cada axón procedente de la retina sólo posea el código de la única neurona del tectum con la cual debe conectarse.

No obstante, otros muchos experimentos de regeneración de este tipo han llevado a la siguiente noción: al final de los procesos de regeneración, las conexiones interneuronales son siempre restablecidas según el mismo plan de organización que tenían antes de la lesión, como en el caso del experimento precedente. Antes que la especificación precisa y predeterminada punto por punto de las conexiones, son las relaciones de los axones entre sí en el seno de su territorio objetivo las que parecen ser especificadas.

La hipótesis de la quimioafinidad resulta muy tentadora por dos razones: permite refutar el modelo funcionalista del desarrollo del sistema nervioso elaborado por Weiss sin, por otra parte, dejar de proponer una teoría general del mecanismo de reconocimiento celular que interviene en el establecimiento de las conexiones nerviosas. Sin embargo, comporta dos aspectos problemáticos. Primero, no se dispone de ninguna indicación referente al número total de códigos químicos individuales que serían necesarios para una preespecificación de las interconexiones nerviosas. J.P. Changeux, del Instituto Pasteur de París, ha señalado que, realizando una evaluación prudente del número de códigos necesarios, el problema estriba en saber si las capacidades del patrimonio genético le permiten codificar toda la información necesaria en un grado tal de especificación.[3] El segundo problema ligado a esta teoría es que no proporciona ninguna indicación en cuanto a la naturaleza de la interacción que está en el origen de la afinidad selectiva entre el axón y su objetivo.

Algunos experimentos realizados estos últimos años indican que el control de las relaciones entre axones en crecimiento, y muy generalmente de las células en migración, depende de procesos de adherencia entre células.

Unos embriones que se reconstituyen

En realidad, los embriólogos saben desde hace tiempo que las propiedades de adherencia entre las células desempeñan un papel fundamental en la edificación del organismo. A principios del siglo xx, H.V. Wilson, en Gran Bretaña, ya había observado que tras disociación mecánica completa de las células que componen un organismo muy simple, como un espongiario, las células dispersadas pueden volver a unirse lentamente y reconstituir espontáneamente el organismo entero. En otros experimentos, H.V. Wilson había incluso disociado simultáneamente dos espongiarios, pertenecientes a especies diferentes, y caracterizado cada uno con un color diferente.

Como consecuencia del proceso de reagregación celular, dos organismos, cada uno de color diferente, se reconstituían: las células pertenecientes a los dos espongiarios diferentes no se habían asociado en absoluto. Estos resultados probaban que los procesos de reagregación y en consecuencia de reconocimiento celular son específicos, puesto que permiten distinguirse a las células de dos especies diferentes.

Experimentos similares fueron efectuados por el embriólogo alemán J. Holtfreter, entre los años 1930 y 1950, en embriones de vertebrados,[4] que disociaba colocándolos en unos medios básicos de (pH elevado). Al restablecer el valor normal del pH, desencadenaba la reconstitución espontánea del embrión y la reanudación completamente normal del desarrollo. Lo que resultaba notable en los experimentos de Holtfreter, es que obtenía reconstituciones y reanudaciones de desarrollo, incluso cuando había disociado embriones bastante evolucionados, como los que habían desarrollado ya un rudimento de sistema nervioso. Los embriones conserbavan la capacidad de reconstituirse, aun cuando en este estadio comprendían cuatro tipos de tejidos diferentes, organizados de manera compleja unos en relación a otros. Esto significa que el proceso de reagregación debe hacer que intervenga un mecanismo muy específico de reconocimiento celular que permite a las células análogas adherirse

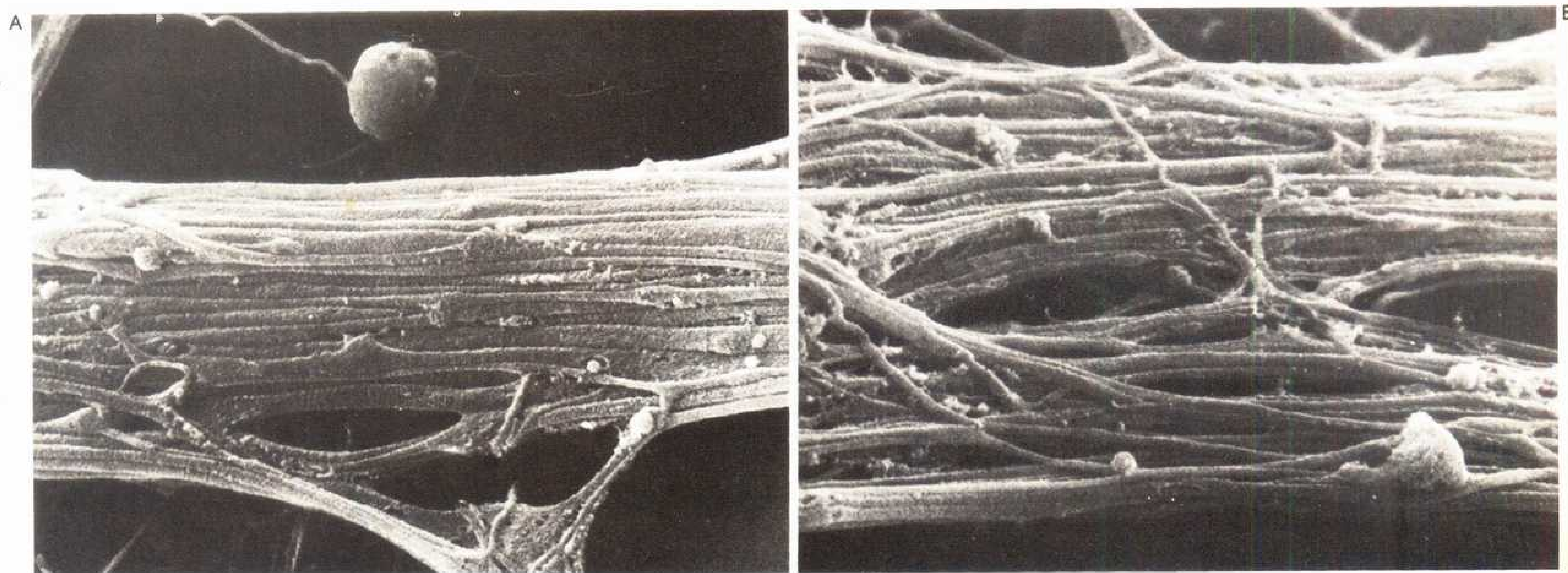


***Figura 4.** La instalación de la circuitería neuronal en el cerebro es resultado de las relaciones de «vecindad» que mantienen entre sí las células nerviosas. Estas relaciones son reguladas por unas moléculas de adherencia celular (N-CAM) llevadas a la superficie de las células nerviosas o de sus prolongaciones, los axones. Gracias a estas moléculas, los axones pueden crecer estrechamente asociados en haces. Eso es lo que muestra la foto A: se trata de un haz de axones procedentes de neuronas en cultivo. Si al cultivo se añaden unos anticuerpos dirigidos contra las moléculas CAM (lo cual inhibe la capacidad de adherencia de estas moléculas), los axones ya no se asocian bien en haces, como muestra la foto B. (Fotos U. Rutishauser.)*

(2) R.W. Sperry, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 50,* 703, 1963.
(3) J.P. Changeux, A. Danchin, *Nature, 264,* 705, 1976.
(4) P.L. Thownes, J. Holtfreter, J. *Exp. Zool., 128,* 53, 1955.

selectivamente y reconstituir una organización histológica compleja. J. Holtfreter considera a raíz de estos experimentos, que las células embrionarias son portadoras de moléculas de supercicie específicas de cada tipo celular. En su opinión los mecanismos por los que un embrión se organiza, se construye, dependían de estas interacciones específicas entre las moléculas de superficie de las células. Después ha podido demostrar que los mismos mecanismos celulares gobiernan los movimientos de la morfogénesis.

técnicas inmunoquímicas. A partir de esta época, el equipo de G. Edelman, del Instituto Rockefeller en Nueva York, identificó en diferentes estadios embrionarios unas moléculas responsables de la adherencia entre células (la abreviación CAM, que corresponde a «Cell Adhesion Molecules») y en particular las del sistema nervioso.(5) Con mayor exactitud, estos investigadores han aislado y caracterizado tres clases de moléculas CAM: una fue bautizada L-CAM (por Liver-CAM, pues fue identificada por primera vez en la superficie

en la formación del sistema nervioso? El equipo de G. Edelman ha mostrado que imponen dificultades a los movimientos de las células nerviosas en migración o de los axones en curso de crecimiento. En efecto, las células nerviosas son susceptibles de adherirse más o menos fuertemente entre sí, por medio de sus moléculas de superficie N-CAM, o con las células gliales por medio de sus moléculas de superficie Ng-CAM. Por ejemplo, U. Rutishauser, uno de los colaboradores de G. Edelman, ha mostrado que el reagrupamien-

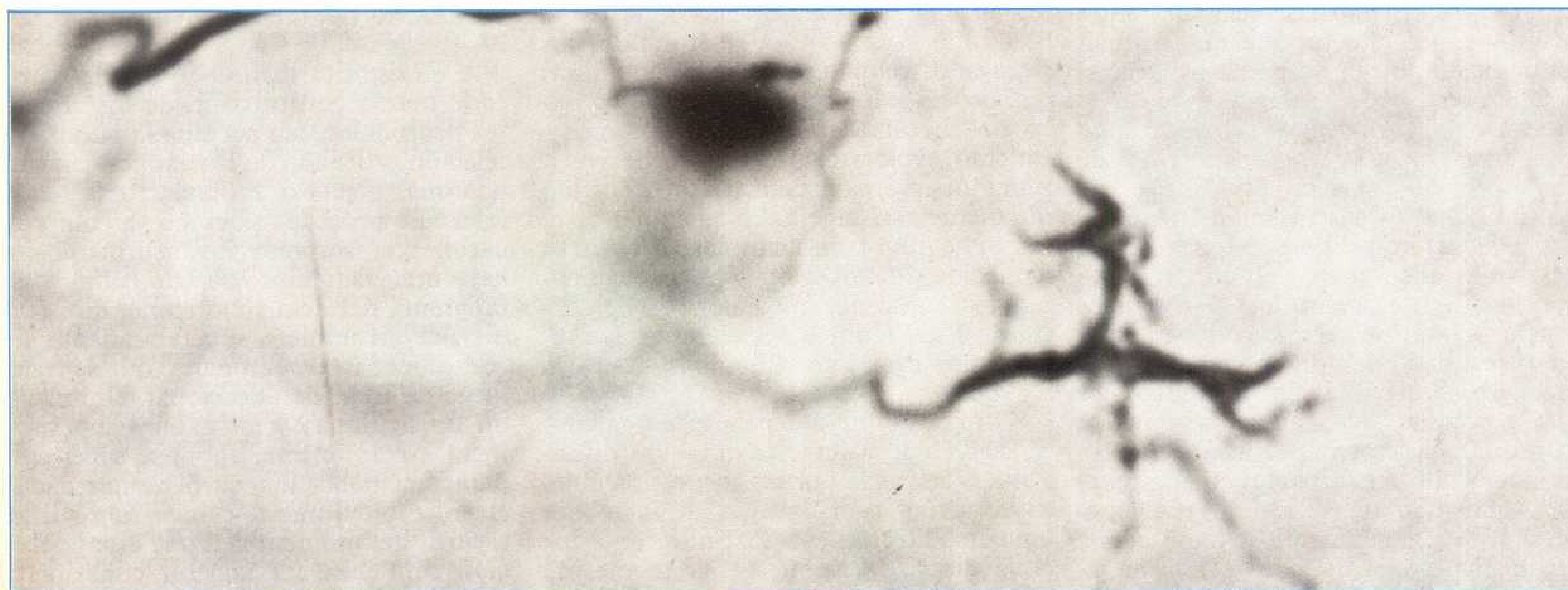


Figura 5. El establecimiento de la circuitería nerviosa durante las etapas precoces del desarrollo se basa en los movimientos de elongación de los axones. Éstos pueden recorrer grandes distancias para alcanzar su objetivo final. Su progresión en el seno del cerebro está asegurada por los movimientos de su cono de crecimiento. En esta foto se ve el cono de crecimiento de un axón de una neurona retiniana que llega a su objetivo (el cuerpo geniculado lateral) en un gatito de 25 días de edad. Arriba y a la izquierda de la foto se advierte el axón (ligeramente fuera del plano focal). Se extiende hacia la derecha para terminar en un cono de crecimiento constituido por un conjunto de finas prolongaciones. Descritos primero por Ramón y Cajal a principios del siglo XX, los conos de crecimiento son unas estructuras muy especializadas que contienen todos los órganos celulares necesarios en la producción de energía y de proteínas. Estas moléculas proteicas tienen en realidad una doble función. Primero, suministran reservas de proteínas citoplásmicas, y son necesarias para la extensión de la membrana del axón y, en segundo lugar, proporcionan las moléculas de superficie responsables de la adherencia selectiva sobre el sustrato. Los conos de crecimiento no se desplazan según un trayecto directo y continuo sino que, al contrario, efectúan un movimiento exploratorio incesante del entorno. La progresión de los conos de crecimiento se realiza ciertamente en respuesta a diferentes factores. Buscan unas pistas preestablecidas de alta adherencia y parecen responder a unas sustancias tróficas emitidas por la estructura objetivo. (Foto M. Friedlander.)

Diversas colas para la adherencia de las células

La hipótesis de Holtfreter era muy avanzada para su tiempo, y ulteriormente proporcionó el marco conceptual de muchas ideas recientes acerca de la embriogénesis en general y el desarrollo del sistema nervioso en particular. Según la hipótesis de Holtfreter, los movimientos celulares, la facultad de reconocimiento de las células y sus propiedades adhesivas están gobernados por un mecanismo único: la interacción específica entre unas moléculas de superficie. ¿Cuáles pueden ser realmente estas moléculas que regulan las interacciones entre células y, en lo que concierne al sistema nervioso, entre axones? ¿Qué mecanismos pueden conducir a la instalación ordenada de las conexiones entre axones y neuronas en el seno de un territorio? Solamente a partir de los años 1970 afloraron las primeras respuestas a estas cuestiones gracias a las

de células de hígado), otra se llama N-CAM (por Neural-CAM), la última, Ng-CAM (por Neural-Glial-CAM).

En el embrión de pollo, G. Edelman y J.P. Thiéry (que ahora está en el Instituto de embriología del Centro Nacional de Investigación Cinetífica de Nogent-sur-Marne) han observado que, en cualquier inicio del desarrollo embrionario, todas las células llevan en superficie a la vez las moléculas N-CAM y L-CAM. Después, en el momento de la aparición del tejido nervioso, interviene una notable segregación: sólo las células que van a dar el tubo neural siguen expresando las moléculas N-CAM, pero no las L-CAM. Inversamente, todas las células del embrión, cualesquiera menos las del tejido nervioso, sólo presentan las moléculas L-CAM. Ulteriormente aparecen las moléculas Ng-CAM únicamente en la superficie de las células nerviosas, en el momento de la aparición de las células gliales.

¿Cómo intervienen estas moléculas

to de los axones en transcurso de crecimiento en haz depende de estas moléculas.(6,7) En un cultivo de neuronas al que se le añadan unos anticuerpos dirigidos contra las moléculas N-CAM (lo cual tiene por efecto inhibir su capacidad adhesiva) los axones dejan de asociarse en haces (fig. 4).

Del conjunto de los trabajos de G. Edelman y de sus colaboradores se puede desprender una regla general que permita comprender cómo intervienen las moléculas N-CAM. Cuando la colocación de las estructuras y de los circuitos nerviosos se cumple por migraciones celulares importantes, asistimos a un aumento de la fluidez de los elementos nerviosos, que refleja una baja de su capacidad de adherencia mutua. Esto resulta por una parte de la disminución de la densidad de las moléculas N-CAM en la superficie de las células y, por otra, de la modificación de su estructura molecular. En efecto, la N-CAM embrionaria (E-CAM) muestra baja adhesivi-

(5) G.M. Edelman, *Science, 219,* 450, 1983.
(6) U. Rutishauser, *Nature, 310,* 549, 1984.
(7) J. Silver, U. Rutishauser, *Dev. Biol., 106,* 485, 1984.

Los planos de conexión entre neuronas cambian en el transcurso del desarrollo.

dad, mientras que la N-CAM adulta (A-CAM) la posee en alto grado. Inversamente, cuando las células o los axones han llegado a su destino final, las moléculas N-CAM reaparecen o toman una forma química que asegura una gran fuerza de adherencia (lo cual corresponde a la conversión de la forma E-CAM en la forma A-CAM).

¿Permiten las explicaciones aportadas por los trabajos de G. Edelman comprender finalmente cómo se hace la especificación propiamente dicha de los circuitos neurónicos? Realmente parece que sí, en la medida en que las moléculas N-CAM regulan las relaciones entre neuronas. Así, el equipo de G. Edelman ha demostrado que se podía explicar el defecto que padece el ratón mutante denominado *staggerer* considerando una perturbación del mecanismo de conversión de estas moléculas. Este ratón presenta un paso vacilante (*to stagger:* vacilar) como consecuencia de un desarrollo incorrecto del conexionado nervioso en el cerebelo. Desde hace mucho tiempo se sabe que esta anomalía es resultado de una mutación genética. Pero, hasta 1982, se ignoraba por qué mecanismo la mutación genética impedía un desarrollo correcto de las interconexiones neuronales en el cerebelo. Aquel año, G. Edelman y Cheng-Ming Chuong publicaron sus resultados, según los cuales la conversión de la forma embrionaria (E-CAM) de escaso poder adherente en la forma adulta A-CAM de fuerte poder adherente era muy tardía en el cerebelo de los ratones *staggerer*.[8] Ahora bien, parece que en el animal normal, la conversión de las moléculas E-CAM en moléculas A-CAM, que conduce a aumentar considerablemente la adherencia entre células nerviosas, permite detener las migraciones de las neuronas en el cerebelo y así fijar las interconexiones en un estado dado. En el ratón *staggerer,* la mutación genética acarrea una ausencia del enzima que realiza la conversión de las moléculas E-CAM en moléculas A-CAM. En consecuencia, las migraciones celulares prosiguen demasiado tiempo y las neuronas no toman su lugar correcto en la «circuitería».

(8) G.M. Edelman, Cheng Ming-Chuong, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 79,* 7036, 1982.
(9) T.Y. Horder, K.A.C. Martin, *Symp. Soc. Exp. Biol., 32,* 275, 1979.
(10) R. Levi-Montalcini, *Prog. Grain Res., 45,* 235, 1976.
(11) W.M. Cowan *et al., Science, 225,* 1258, 1984.
(12) F. Crepel, *Trends in neurosciences, 5,* 266, 1982.

Unas conducciones «Geográficas» y químicas

Hasta aquí hemos visto cómo las moléculas N-CAM ejercen una influencia organizadora en poblaciones enteras de axones. Es posible que las CAM sirvan también para guiar el crecimiento de los axones individuales. Se ha podido demostrar[6] que el movimiento exploratorio del cono de crecimiento (fig. 5) que se encuentra en la extremidad del axón sirve para buscar una pista preestablecida, formada por las moléculas CAM. Este camino preestablecido de moléculas CAM permite al axón recorrer el tejido nervioso y proseguir un trayecto preciso y predeterminado.

No obstante, es muy probable que las moléculas CAM no representen más que uno de los mecanismos de conducción de las migraciones celulares y de los movimientos de crecimiento de los axones. Se sabe desde hace mucho tiempo que también hay una conducción puramente mecánica de éstos en elongación por los obstáculos físicos del microentorno celular, de la misma manera que las neuronas, muy al comienzo del desarrollo, son guiadas por la glia radial en su migración en el seno de la pared del tubo neural.[9] De este modo, los agregados celulares o los haces de fibras ya constituidos suministrarían los soportes mecánicos. En este caso, el movimiento exploratorio del cono de crecimiento sirve para detectar un recorrido de menor resistencia. En cualquier caso, en los cultivos de neuronas *in vitro,* es conocido que los axones crecen siguiendo los contornos morfológicos del entorno local (como, por ejemplo, las rayas y los surcos en el fondo de las cajas de Petri).

Otra posibilidad depende de una conducción por sustancias químicas difundibles: emitidas por los territorios objetivo, serían captadas por unos axones en curso de crecimiento. Entonces, éstos se dedicarían a seguir sus gradientes de concentración hasta alcanzar la fuente emisora (donde la concentración es más fuerte). Hace ya bastante tiempo que este cometido ha sido propuesto por la investigadora italiana Rita Levi-Montalcini, que acaba de recibir el premio Nobel 1986, para el factor de crecimiento del nervio o NGF (por «Nerve Growth Factor») (véase los factores de crecimiento» en nuestro número de diciembre 1986). Éste ejerce incontestablemente una conducción direccional en el crecimiento de los axones de ciertas neuronas. Sin embargo, las levísimas tasas de NGF detectadas en las diferentes regiones del cerebro no parecen indicar un cometido de sustancia trófica universal de esta proteína en el interior del sistema nervioso.[10]

Es muy probable que la conducción de los axones en crecimiento obedezca a una combinación de estos tres tipos de factores: adhesividad celular, geográfico y químico. U. Rutishauser ha mostrado recientemente cómo esta combinación podía ponerse de manifiesto en el embrión de pollo.[6] Según sus resultados, las moléculas N-CAM permiten a los axones del nervio óptico reagruparse en haces bien ordenados a la salida del globo ocular, lo que los pone en camino de alcanzar directamente el tectum. Si se impide actuar a las moléculas N-CAM por medio de anticuerpos (anti N-CAM), algunos axones no siguen ya sino groseramente el camino que lleva al tectum. Algunos, totalmente desencaminados, pasarán resueltamente cerca de este territorio objetivo. Otros, sin embargo, serán capaces de rectificar su recorrido cuando lleguen cerca del tectum y de conectarse efectivamente de manera apropiada con éste. Según los datos de Rutishauser, los axones desencaminados que pueden rectificar su trayectoria son los que pasan más cerca del objetivo. Los que lo hacen más lejos ya no. Esto sugiere que el objetivo debe emitir una sustancia química difundible que actúa a corta distancia y que da una señal de dirección a los axones en crecimiento.

La muerte neuronal

A un espíritu cartesiano podría parecerle que la construcción de los circuitos neuronales sólo necesita la puesta en relación ordenada de los axones con sus neuronas objetivo. En realidad, la naturaleza no procede así, como ya comprobaron con sorpresa los neurobiólogos hace mucho tiempo. Sucede como si el programa del desarrollo comenzara por instalar un número superabundante de conexiones interneuronales, que se trata luego de triar, de seleccionar, eliminando las neuronas y los axones supernumerarios. En efecto, ahora se sabe que, para una población de neuronas dada, el proceso de muerte celular sobreviene a partir del momento en que esta población comienza a establecer conexiones con su extructura objetivo. Si se realiza la ablación de una parte de ésta, ello acarrea un aumento de la muerte neuronal entre las células que envían allí axones. Según W.M. Cowan, del Salk Institute en Estados Unidos, este tipo de resultados sugiere que la muerte neuronal sería un medio de ajustar el tamaño de una población de neuronas al de su territorio objetivo. Diríase que la muerte neuronal es un fenómeno de eliminación selectiva, resultante de una competición entre las neuronas para captar por sus axones una sustancia química trófica (es decir nutricia) disponible en cantidades limitadas en el territorio objetivo.[11]

También hay unos fenómenos de eliminación de axones supernumerarios a nivel de algunas conexiones, sin que ello acarree la muerte de las neuronas de origen. Así, en la década de los años 1970, L. Brown, de la universidad de Oxford en Gran Bretaña, observó que en los mamíferos recién nacidos la inervación de las fibras musculares era realizada simultáneamente por medio de numerosos axones. Algo más tarde en el desarrollo posnatal, esta multiinervación cede el sitio a una inervación única, donde cada célula muscular es inervada por un solo axón a la vez. En 1982, F. Crepel, de París, puso de manifiesto el mismo fenómeno de regresión de una multiinervación hacia una inervación única a nivel de ciertas neuronas (células de Purkinje) en el cerebelo de rata recién nacida.[12] Aquí podemos

plantearnos la cuestión: ¿no llevan estos fenómenos de eliminación de axones a disminuir la eficacia del interconexionado neuronal? Nada de eso, bien al contrario. El axón que persiste presenta en realidad muchos más puntos de contacto (o sinapsis) con las neuronas inervadas.

Hasta aquí hemos visto que la eliminación de axones, que para comenzar parece paradójica, conduce a un refinamiento de las conexiones neuronales. Sin embargo, hay otra forma de eliminación del axón, verdaderamente sorprendente, que conduce a cambios completos de los esquemas de interconexionado de algunos circuitos. Dicho de otro modo, los planos de la circuitería cerebral cambian en el transcurso del desarrollo: no tienen la misma organización en el animal inmaduro que en el animal adulto. De este modo un equipo americano[13] y nuestro propio grupo de investigación en Bron[14] han puesto de manifiesto recientemente que los axones que constituyen un haz de nervios particular no tienen la misma procedencia en el animal adulto que en el animal inmaduro. Por ejemplo, en la rata como en el hurón adulto, el haz nervioso llamado haz piramidal (que desciende de los hemisferios cerebrales hacia la médula espinal para gobernar la actividad de los músculos), está compuesto de axones procedentes de las neuronas de la capa n.º 5 de una zona (o área) del córtex de los hemisferios cerebrales; el córtex motor, es decir, la región del córtex que envía directamente las órdenes a los músculos. Ahora bien, en la rata o en el hurón recién nacido, nuestro equipo, como el equipo americano, ha mostrado que los axones del haz piramidal provenían de la capa 5 de todas las áreas corticales del conjunto de los hemisferios cerebrales, inclusive del córtex sensorial (es decir, del córtex que trata la información procedente de los órganos de los sentidos). Estos resultados muestran que en un sentido inmaduro el córtex, que normalmente trata la información sensorial, está conectado a unas vías nerviosas que transportan señales de mando motriz.

Nuestro grupo de investigación[15] y el de G.M. Innocenti en Lausana[16] han puesto de manifiesto recientemente otro ejemplo de remodelado de las interconexiones neuronales en el transcurso del desarrollo. En los hemisferios cerebrales de gato recién nacido hay unos axones que ponen en relación las neuronas de las áreas auditivas y somatosensoriales con las neuronas de las áreas visuales (se trata de áreas corticales que corresponden a unas neuronas que reciben los mensajes de los órganos sensoriales auditivos, cutáneos y visuales). Estas conexiones quizá tienen como función permitir unas interacciones entre las señales procedentes de los diferentes receptores sensoriales en el estadio inmaduro. Desaparecen por eliminación

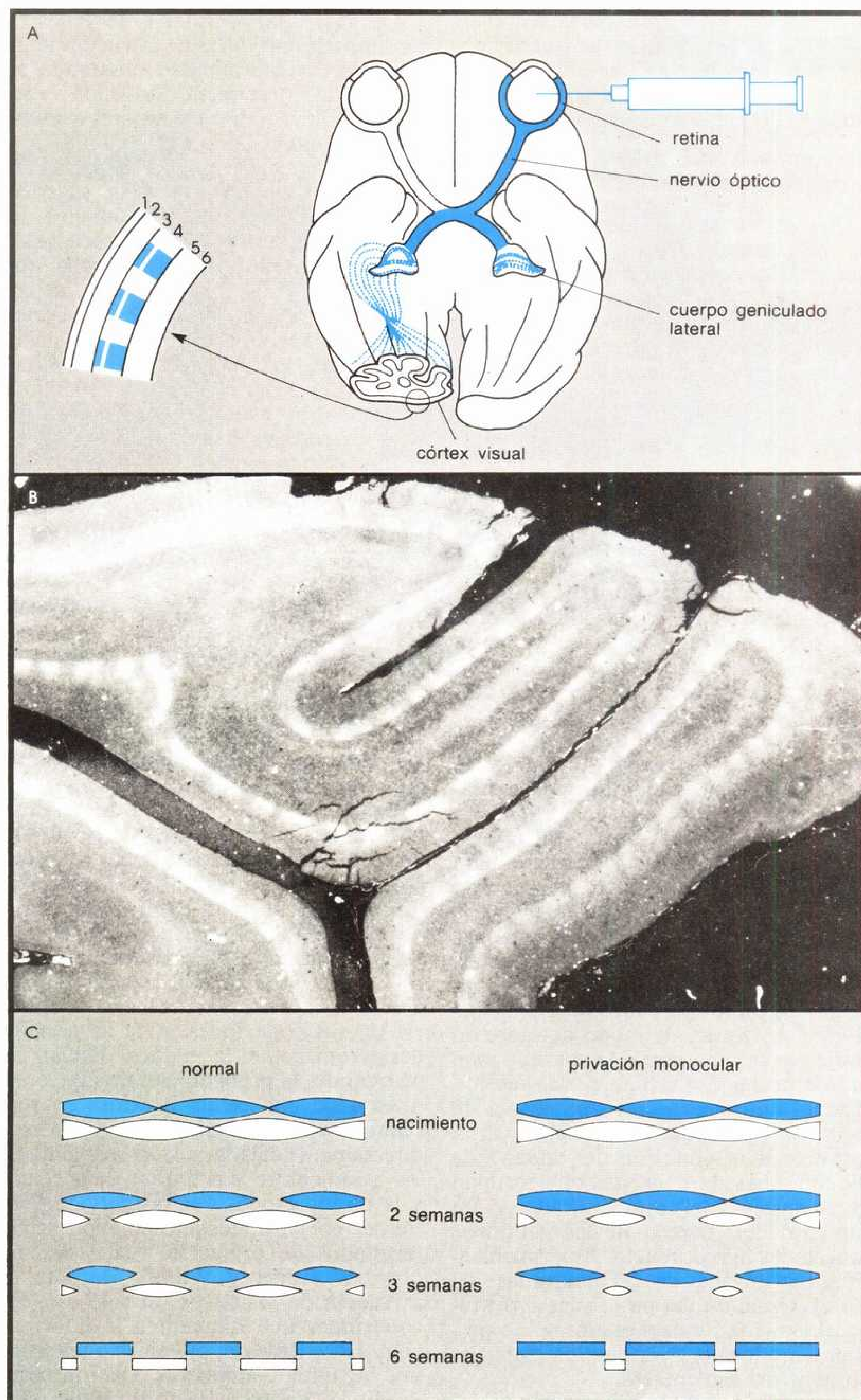


Figura 6. Numerosos experimentos realizados en el sistema visual del gato o del mono han permitido poner de manifiesto el cometido funcional de los circuitos neuronales en su instalación y su mantenimiento. El esquema A muestra un cerebro de mono visto por debajo. Los axones procedentes de las neuronas ganglionares de la retina llegan a un territorio objetivo, llamado cuerpo geniculado lateral. Las neuronas de esta estructura emiten a su vez unos axones con destino al córtex visual de los hemisferios cerebrales (completamente detrás del cerebro). Si se inyecta un aminoácido radiactivo en la retina, se puede observar el marcado a la llegada de los axones, en la capa n.º 4 del córtex visual (como consecuencia de un fenómeno de transporte a lo largo de las vías nerviosas). De este modo se puede comprobar que en esta capa, unas zonas de neuronas que reciben los axones procedentes de la vía visual marcada se alteran regularmente con otras de neuronas conectadas con el ojo no inyectado. En B, la alternancia de estas zonas se pone de manifiesto en la capa n.º 4 del córtex visual de un gibón, gracias al método indicado más arriba (autorradiografía proporcionada por H. Cooper). El esquema C ilustra el proceso de segregación de las zonas neuronales correspondientes a cada ojo: esta segregación se realiza progresivamente en el transcurso de las seis primeras semanas después del nacimiento (las zonas en color corresponden a unas neuronas que reciben los mensajes de un ojo; las blancas, a neuronas que reciben los mensajes del otro ojo). En un mono recién nacido, a quien se ha suturado los párpados de uno de los dos ojos, las zonas de neuronas conectadas al ojo suturado retroceden progresivamente, mientras que las conectadas al ojo abierto se extienden.

(13) B.B. Stanfield *et al., Nature, 298,* 371, 1982.
(14) C. Dehay, *et al., J. Physiol.,* (Lond.), *382,* 97P, 1987.
(15) C. Dehay *et al., Exp. Brain Res., 57* 208, 1984.
(16) G.M. Innocenti, S. Clarke, *Dev. Brain Res., 14,* 143, 1984.

La instalación de la conexiones es regulada también por la actividad de los circuitos.

de axones al cabo de algunas semanas. Estos resultados demuestran que las conexiones nerviosas no están organizadas de la misma manera en diferentes estadios del desarrollo.

¿Desempeña un papel la experiencia sensorial?

Una vez instalados diferentes elementos del cerebro ¿está éste listo para funcionar o necesita un período de rodaje durante el cual la actividad nerviosa efectuará un ajuste final de las conexiones? Numerosos experimentos efectuados estos últimos veinte años han revelado que el mismo funcionamiento de los circuitos nerviosos desempeña un papel en su instalación. Una gran parte de estos experimentos ha sido realizada por T. N. Wiesel y D.H. Hubel en el sistema visual (en 1981 recibieron el premio Nobel por estos trabajos).[17] Para comprender sus resultados, es preciso recordar brevemente la descripción de las vías visuales en el adulto (véase «La neurobiología de la imagen» en nuestro número de julio/agosto 1983). Las terminaciones de los axones procedentes del ojo izquierdo y del ojo derecho son estrictamente separadas a su llegada al córtex visual, formando de esta manera zonas alternadas de neuronas corticales (llamadas columnas de dominancia ocular) (fig. 6). En el animal recién nacido, esta segregación neta en columnas de dominancia ocular no existe. Se establece progresivamente y no da fin sino al cabo de seis semanas del nacimiento. D.H. Hubel y T.N. Wiesel hicieron el siguiente experimento: suturaron los párpados de uno de los ojos de un gatito, de modo que éste no pudiera ver más que con un solo ojo. Transcurridas dos semanas, volvieron a abrir el ojo clausurado. Con ayuda de registros electrofisiológicos observaron entonces una reducción del tamaño de las columnas de neuronas que recibían los mensajes del ojo suturado y un aumento del tamaño de las columnas conectadas al ojo intacto. Esta organización modificada de las columnas del córtex visual estaba en lo sucesivo irrevocablemente fijada y el animal no percibía en adelante más que los mensajes visuales del ojo intacto.

La capacidad de la experiencia visual de modificar las conexiones funcionales del córtex visual está limitada a los tres primeros meses de vida (es lo que se llama el período crítico). A partir de esta experiencia, se habría podido suponer que la privación total de visión habría conducido a unas modificaciones todavía más importantes de las conexiones del córtex visual y a la ceguera completa del animal. En la realidad no ocurre así. Cuando Wiesel y Hubel suturaron ambos ojos, para su gran sorpresa observaron que la distribución de las columnas en el córtex visual era práticamente idéntica a la observada en el animal normal.

(17) T.N. Wiesel D.H. Hubel, *J. Neurophysiol., 28,* 1029, 1985.
(18) T.N. Wiesel, *Nature, 299* 583, 1982.
(19) D.O. Hebb, *The organization of behavior,* J. Wiley and Sons, 1949.
(20) G.S. Stent, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 70,* 997, 1973.

Las marcadas mermas observadas en los animales privados de la visión de un ojo y la casi normalidad observada en los animales totalmente privados de visión han llevado a estos autores a considerar que no es la no utilización de una vía visual en sí misma lo que origina las deficiencias observadas. Han sugerido que debe haber unos fenómenos de competición entre axones procedentes del ojo izquierdo y del ojo derecho, que intervienen en la instalación de las conexiones con las neuronas del córtex visual.[18] Así, en el caso de la privación monocular, los axones que transmiten los mensajes del ojo abierto establecen contactos en unas regiones del córtex muy extendidas puesto que no sufren prácticamente ninguna competencia por parte de los axones que llevan los mensajes del ojo suturado. En cambio, en el caso de la privación binocular, ninguno de los circuitos que llevan los mensajes visuales de uno u otro ojo es favorecido por su funcionamiento y las columnas de córtex correspondientes a cada uno de los dos ojos son, pues, iguales y se alternan regularmente.

Todo ello significa, pues, que la instalación del conjunto de las conexiones del sistema nervioso central está también regulada por la actividad de los circuitos. Desde 1949, el americano D.O. Hebb había propuesto una teoría de autorregulación de las conexiones del sistema nervioso central por su propio funcionamiento para explicar este tipo de proceso.[19] Según su teoría, la sincronización entre la actividad de una célula nerviosa y la actividad de los axones que la inervan, refuerza la eficacia de sus conexiones. A la inversa, la desincronización la reduce. Dicho de otro modo, la probabilidad de funcionamiento de una célula nerviosa en respuesta a una señal de entrada dada está directamente ligada a la correspondencia basada entre la actividad de la célula y la de los axones que la inervan. Este tipo de conclusiones pueden explicar los resultados de privación visual obtenidos por Hubel y Wiesel. Durante la privación de visión de un solo ojo, las conexiones que transmiten la información procedente del ojo abierto tendrían una actividad altamente sincronizada. Según la hipótesis de D.O. Hebb, ello tendría por consecuencia eliminar el potencial de descarga de las conexiones que vehiculan la información procedente del ojo ocluido.[20] Se ha demostrado claramente que mecanismos tales como el propuesto por Hebb proporcionan una explicación de ciertos aspectos del desarrollo del sistema nervioso central y permiten comprender algunos fenómenos complejos, tales como el aprendizaje adaptativo, lo cual conduce a la especulación, muy interesante, de que los mecanismos del desarrollo y del aprendizaje en el adulto tendrían unas bases biofísicas comunes.

La historia de la neurobiología del desarrollo refleja la evolución de los conceptos del funcionamiento del cerebro adulto. A principio de los años 1930, la concepción «reticularista» era firmemente defendida por Golgi y otros neurobiólogos. En la misma época, se pensaba que las interconexiones del sistema nervioso que permiten un comportamiento apropiado del organismo se establecían por la actividad neuronal a partir de un estado inicial de conexiones difusas. Ya en los años 1940 se empezó a fijar la localización de las funciones cerebrales y, paralelamente, los experimentos de R. Sperry marcaron el advenimiento de un concepto estructuralista del desarrollo neuronal. En 1987 no se puede explicar el proceso de instalación de las conexiones neuronales por un único mecanismo. Los trabajos de Wiesel y Hubel en el córtex visual muestran que la actividad neuronal desempeña un papel crucial en el desarrollo. Sin embargo, se ha probado en repetidas ocasiones que la instalación de conexiones neuronales estaba genéticamente programada. Esta dicotomía no tiene nada de sorprendente, si consideramos que los recientes trabajos de investigación han puesto de manifiesto la multiplicidad de los factores activos en los procesos neurobiológicos. En el caso de la conducción axonal, por ejemplo, los mecanismos morfogenético, quimioespecífico y de adherencia selectiva desempeñan sendos cometidos. Será muy difícil determinar el papel exacto de cada uno. Cuando lo consigamos, no sólo habremos dado un gran paso adelante en la comprensión de los orígenes del cerebro, acaso proporcionando también al clínico la posibilidad de inducir una reinervación funcional en un cerebro adulto dañado. ■

Para más información:

- R.D. Lund, *Development and plasticity of the brain. An introduction,* Oxford University Press, 1978.
- D. Purves, J.W. Lichtman, *Principles of neural development,* Sinauer Associates Inc., 1985.
- G.M. Edelman, W.E. Gall, W.M. Cowan (eds.), *Molecular bases of neural development,* John Wiley, 1985.

- Para una bibliografía más completa véase la página 344.

Comunicación química en medios acuáticos

por María Pilar Bosch

Cada organismo ejerce una doble función de control de su comportamiento, dentro de su especie y dentro de su entorno; cada individuo tiene que ajustarse a las condiciones físico-químicas del medio en que vive y a la presencia de otros organismos para alcanzar un balance funcional completo que determina el ecosistema.
Los ecosistemas acuáticos, como las comunidades biológicas terrestres, se consideran dependientes de las necesidades tróficas y sexuales entre individuos, bien «horizontalmente», entre organismos del mismo nivel, o «verticalmente», a través de diferentes niveles de las cadenas de alimentación.



M.ª Pilar Bosch es Doctora en Ciencias Químicas. Actualmente es becaria postdoctoral del Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

Las últimas investigaciones realizadas para la comprensión de las relaciones entre ecosistemas, sugieren una comunicación vía mediadores químicos. Estas sustancias informan a los organismos de ciertas características del medio ambiente, pudiendo ser favorables o desfavorables para su crecimiento y/o reproducción.

Este concepto de ecología química se desarrolló inicialmente, a partir de trabajos realizados en medios terrestres, que son más asequibles a la experimentación. En la esfera marina, la hipótesis de un control inter e intraespecífico a través de «metabolitos externos» fue postulada por primera vez hace 40 años por Lucas[1] y más recientemente adoptada por Nigrelli,[2] Fontaine[3] y Todd.[4]

Los diversos tipos de mediadores químicos han sido clasificados según criterios muy diferentes: según la función ecológica del mensaje, por su significado para la especie emisora o receptora, por el modo de emisión y por el efecto en individuos de la misma o de otras especies.

Florkin[5] en 1965 ha definido como *ecomonas* a los factores moleculares, específicos o no específicos, que ejercen una acción en la constitución y persistencia de una comunidad biótica. Esta definición corresponde a la de *ectohormonas* de Bethe[6] (1932) y la de *telergonas* de Kirschenblatt[7] (1962). Dependiendo de si los individuos receptores o emisores pertenecen a la misma especie, las ecomonas han sido descritas como *feromonas,* Karlson y Butenandt,[8] (1959) o *alomonas* Brown et al.,[9] (1970) en el caso que pertenezcan a especies diferentes. Los dos tipos de mediadores han recibido diversos nombres: *hemihormonas* (Bethe, 1932),[6] *sociohormonas* y *homotelergonas* (Kirschenblatt, 1962)[7] en lo que afecta a las feromonas. Otras acepciones para las alomonas han sido *aloiohormonas* (Bethe, 1932),[6] *heterotelergonas* (Kirschenblatt, 1962)[7] *coactonas* (Florckin, 1965),[5] *aleloquímicos* (Whittaker, 1970).[10] Brown et al.,[9] (1970) han distinguido tres subgrupos entre las alomonas: *kairomonas,* que provocan una reacción positiva en la especie receptora pero una reacción indiferente o negativa en la especie emisora, tales como las señales que permiten a un predador localizar su presa; *synomonas,* compuestos que inducen respuestas benéficas simultáneamente al emisor y al receptor, tales como las esencias florales y los néctares que interaccionan con el insecto en el proceso de polinización de las flores y *apnemonas,* son los compuestos emitidos por una materia muerta que evoca una respuesta favorable al individuo receptor, pero nociva a un organismo de otra especie que puede encontrarse en dicha materia, tales como el olor emitido por la carne en putrefacción, que ayuda a un predador a localizar a una posible presa que habite en dicho medio.

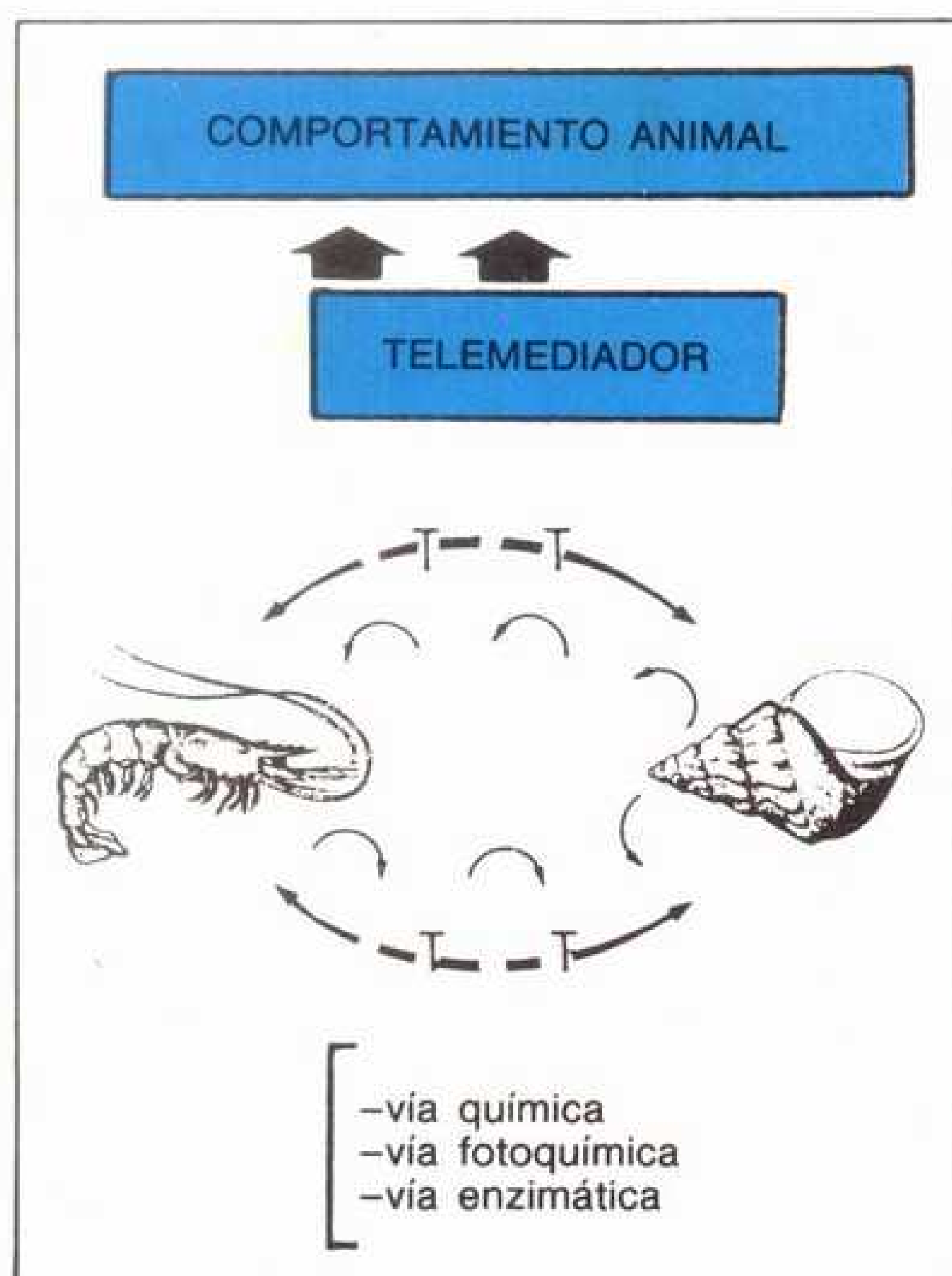


Figura 1. Comunicación vía mediadores químicos.

Esta gran profusión semántica da idea de la variedad y complejidad del fenómeno en estudio. Las definiciones más ampliamente aceptadas son las de *feromonas* (Karlson y Butenandt),[8] si los individuos emisores y receptores pertenecen a la misma especie y *alomonas* si pertenecen a especies diferentes. En 1971 Aubert[11] simplificó el concepto de mensajeros químicos por el de *telemediadores* definiéndolo como las sustancias químicas producidas por animales o plantas marinos liberados al medio, afectando el comportamiento o las funciones biológicas de una misma o de otras especies.

Principios básicos de la comunicación vía mediadores químicos

Para lograr su objetivo el telemediador ha de transmitirse de un individuo a otro, a lo largo de una distancia más o menos considerable, por lo que ha de ser lo suficiente soluble en agua (fig. 1).

En ésta, la difusión de una misma molécula se ve reducida unas mil veces en comparación con la que presenta en el aire. Por el contrario, el «espacio activo» se mantiene durante un intervalo de tiempo muy superior. Puesto que es necesario que la señal desaparezca rápidamente, a fin de evitar fenómenos de acomodación, será necesario que el semioquímico, (palabra derivada del vocablo griego, semeion = señal) sea estructuralmente lábil, capaz de sufrir una degradación química, fotoquímica y/o enzimática.

Las interacciones biológicas mencionadas anteriormente se basan en un fenómeno fundamental: la *quimiorrecepción,* que recibe el nombre concreto de *quimiotaxis* cuando se refiere a organismos marinos. Este modo no visual de percepción está particularmente bien desarrollado en estos organismos, com-

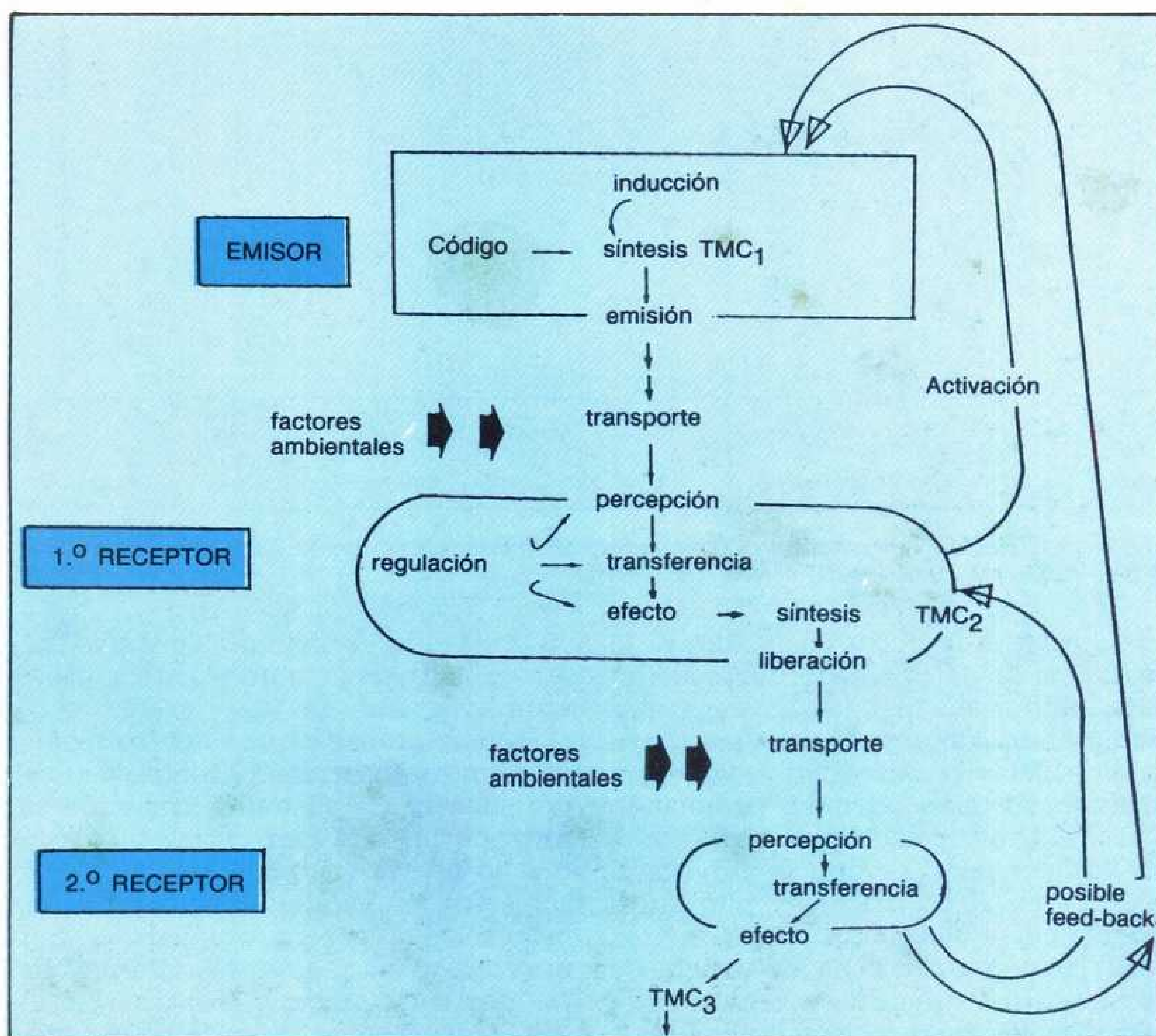


Figura 2. Esquema general de las interacciones biológicas entre distintos individuos de la biocenósis, a través de telemediadores.

(1) Lucas, C.E., 1938, *J. Cons. Per. Explor. Mer., 13:* 309.
(2) Nigrelli, R.F., 1958. *Trans. N.Y. Acad. Sci., Ser. II, 20:* 248.
(3) Fontaine, M., 1970. Conférence Congrès de l'A.F.A.S., Paris.
(4) Todd, J.H., Atema, J. y Boylan, D.B., 1972. *Mar. Tech. Soc. J. 6:* 54.
(5) Florkin, M., 1965. *Bull. Acad. R. Belg., 51:* 239.
(6) Bethe, A., 1932. *Naturwissenchaften, 20:* 177.
(7) Kirschenblatt, J., 1962. *Nature, 195:* 916.
(8) Karlson, P. y Butenandt, A., 1959. *Ann. Rev. Entomol., 4:* 39.
(9) Brown, W.L., Bisner, T. y Whittakeer, R.H., 1970. *Adv. Chemoreception 1:* 35.
(10) Whittaker, R.H. 1970. *Chemical Ecology.* Sondheimer, E. y Simeone, J.B. Editors. Academic Press, Nueva York.
(11) Aubert, M., 1971. *Rev. Int. Océanogr. Méd., 21:* 5.

pensando de esta manera, la ausencia de actividad visual comúnmente encontrada en medios marinos turbios y oscuros.

La comunicación a distancia entre dos organismos (fig. 2) a través de mediación química implica una secuencia de acciones y reacciones en las que cada parte juega un papel decisivo. El organismo emisor del telemediador debe sintetizarlo, ya sea espontáneamente o de manera inducida y liberarlo al medio. El mediador, cuya concentración debe permanecer igual o superior a la del umbral de actividad para ser percibido, converge hacia el organismo receptor sin degradarse o modificarse químicamente. El receptor lo detecta, con o sin absorción y reacciona modificando su propio metabolismo o comportamiento. En algunos casos, ello puede causar incluso la muerte del receptor. En otras situaciones más complejas, se sintetizará un segundo mediador que será liberado de nuevo al medio. Si la estructura del telemediador fuese alterada o modificada por la presencia, por ejemplo, de contaminantes, durante su camino hacia el individuo receptor, el mensaje quedaría alterado, cambiando o incluso destruyéndose su significado, por lo que con el tiempo se provocaría un caos en el ecosistema y por consiguiente en la biocenosis.

Se ha comprobado la existencia de comunicación química en el mar entre bacterias, bacterias y algas, entre algas y entre algas o bacterias y animales marinos.

Interacciones entre bacterias

El mejor ejemplo de una relación directa entre especies a través de sustancias químicas se encuentra en el campo del antagonismo microbiano. Numerosos estudios han descrito antibióticos y antisépticos como principales productos sintetizados por bacterias marinas,[12] así como la producción de enzimas bacteriolíticos exo o endocelulares, activos tanto en bacterias como en hongos. Así pues, para explicar la mayoría de los antagonismos microbianos que ocurren en el medio natural, debe tenerse en cuenta, el conjunto de actividades líticas antibióticas y tóxicas. El asumir que estas acciones son las mismas que tienen lugar «in situ» se fundamenta en observaciones paralelas llevadas a cabo en el mar. Por ejemplo, «Sieburt[13] observó, un antagonismo natural entre Pseudomonas y artrobacterias habitantes de la Bahía de Narraganset, y verificó utilizando técnicas de bioensayo mediante cultivos de ambos grupos bacterianos (fig. 3).

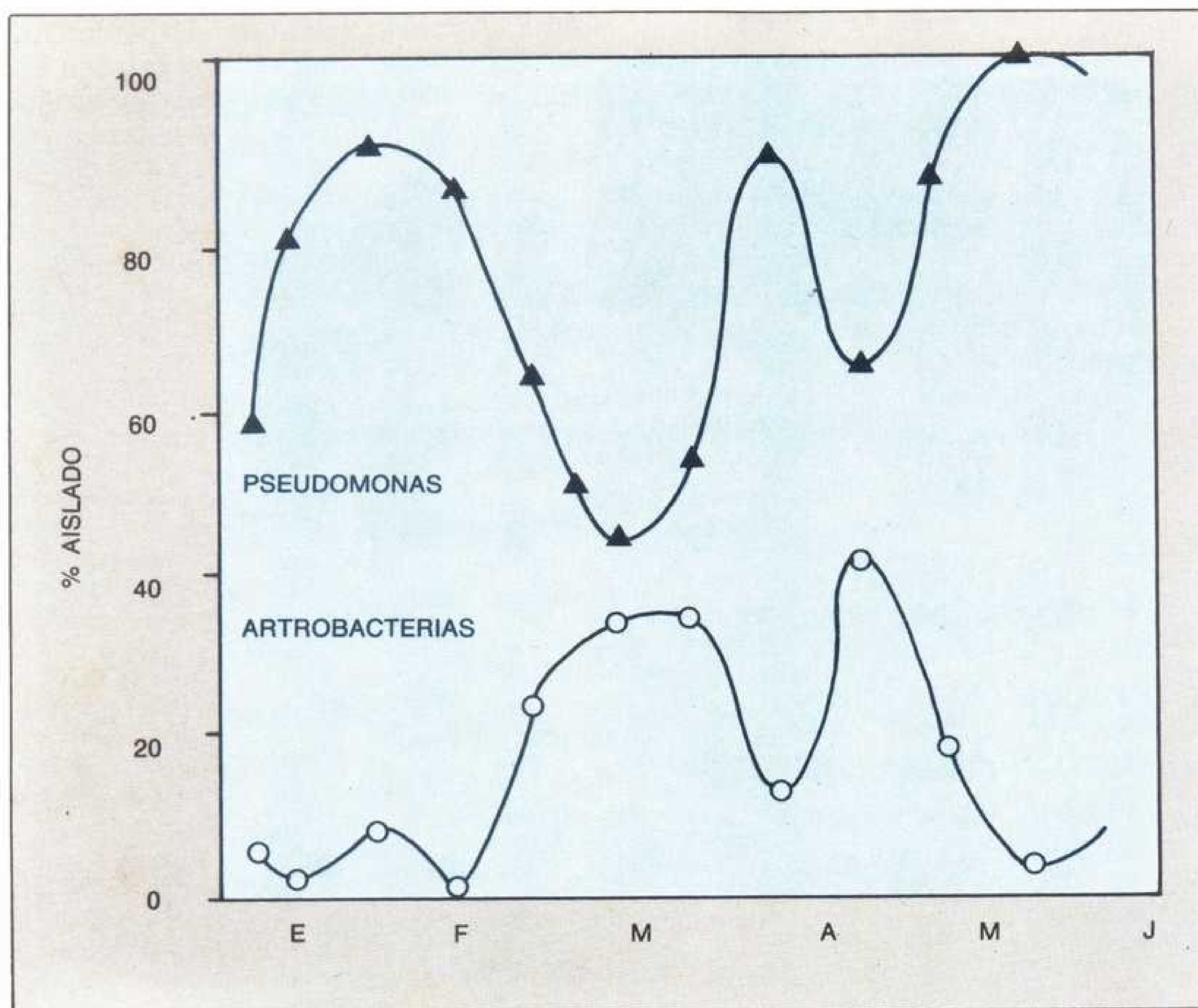


Figura 3. Relación inversa entre Pseudomonas y Artrobacterias en la Bahía de Narraganset (Isla de Rodas), desde enero a junio de 1964.

Es muy probable que estos antagonismos contribuyan a la habilidad del medio marino en su autopurificación de microorganismos terrestres, que son mucho menos competitivos que los organismos autóctonos. Ello implica que las bacterias poseen propiedades quimiorreceptivas y quimiotácticas.[14] Estas dos características etológicas resultan de una serie de comunicaciones químicas secundarias en el organismo receptor. En bacterias, por ejemplo, implican la detección del atractor o del repelente por medio de receptores en la pared celular, la transmisión del estímulo a la célula receptora a través de moléculas químicas como la metionina (S-adenosil metionina), para acabar en una respuesta quimiotáctica que brinda una inversión de la rotación del flagelo (en sentido horario para repulsión, antihorario para atracción). Por ejemplo en *Escherichia Coli*[15] se han detectado cinco clases de quimiorreceptores. Como sustancias atrayentes actúan la D-glucosa, glicina y L-metionina con umbrales de detección de 1 mM, 20 mM y 20 mM respectivamente, que provocan un movimiento de rotación de los flagelos en sentido antihorario, mientras que la L-isoleucina, L-fenilalanina y el salicilato potásico, con umbrales de detección de 20 mM todos ellos, actúan con sustancias repelentes, induciendo un movimiento de rotación de los flagelos en sentido horario.

Interacciones entre bacterias y algas

Muchos estudios de Ecología química han descrito un aumento en el crecimiento de poblaciones bacterianas debido a sustancias orgánicas producidas por algas planctónicas. Los factores de crecimiento pueden ser nutrientes, vitaminas o fitohormonas.[16] Éstos son, generalmente, liberados al medio después de la lisis de las células algales durante la senescencia del cultivo o de la población natural. Además, pueden ser antisépticos o antibióticos: 20-25 % de las algas, diatomeas mediterráneas producen tales inhibidores.[17] Su naturaleza química es variable: ácidos grasos,[18,19], nucleósidos,[20] lipoproteínas complejas,[21] derivados de la clorofila,[22], ácido acrílico.[23] En general, estas sustancias inhibidoras actúan más marcadamente frente a bacterias aerobias gram-positivas, como estafilococos, aunque algunas resultan también activas frente a organismos gram-negativos y varios anaerobios.[17,24] Unas pocas son extremadamente activas, como la producida por *Asterionella notata*,[25], con una concentración mínima inhibidora alrededor de 0,005 μg/ml. También, se ha comprobado una actividad de signo contrario, ya que el alga produce repelentes debido a su propia actividad antibiótica durante el período de crecimiento. Sieburth[13] ha descrito una repulsión fitoplanctónica hacia el anclaje de bacterias por la excreción de compuestos de naturaleza ácida producidos por diatomeas (fig. 4).

Análogamente se ha demostrado que las biosecreciones de algunas diatomeas *(Asterionella japónica, Asterionella notata, Chaetoceros lauderi, Skelotonema costatum, Nitzschia sp.)* contribuyen a la purificación biológica del medio marino y son responsables de la destrucción de bacterias terrestres en mar abierto.

(12) Gauthier, M.J., 1969. *Rev. Int. Océanogr. Méd. 15-16:* 41.
(13) Sieburth, J. McN., 1967. *J. Bacteriol., 93:* 1911.
(14) Adler, J., 1969. *Science, 166:* 1588.
(15) Larsen, S.H., Reader, R.W., Kort, E.N., Tso, W.W. y Adler, J., 1974. *Nature, 249:* 74.
(16) Bentley, J.A., 1960. *J. Mar. Biol. Assoc. U.K., 39:* 433.
(17) Aubert, M., y Gauthier, M.J., 1967. *Rev. Int. Océanogr. Méd., 5:* 63.
(18) Pesando, D., 1972. *Rev. Int. Océanogr. Méd., 25:* 49.
(19) Gauthier, M.J., Bernard, P. y Aubert, M., 1978. *Ann. Microbiol., 129B:* 63.
(20) Aubert, M., Pesando, D. y Pincemin, J.M., 1970. *Rev. Int. Océanogr. Méd. 17:* 5.
(21) Ulitzur, S. y Shilo, M., 1970. *Biochem Biophys. Acta, 201:* 350.

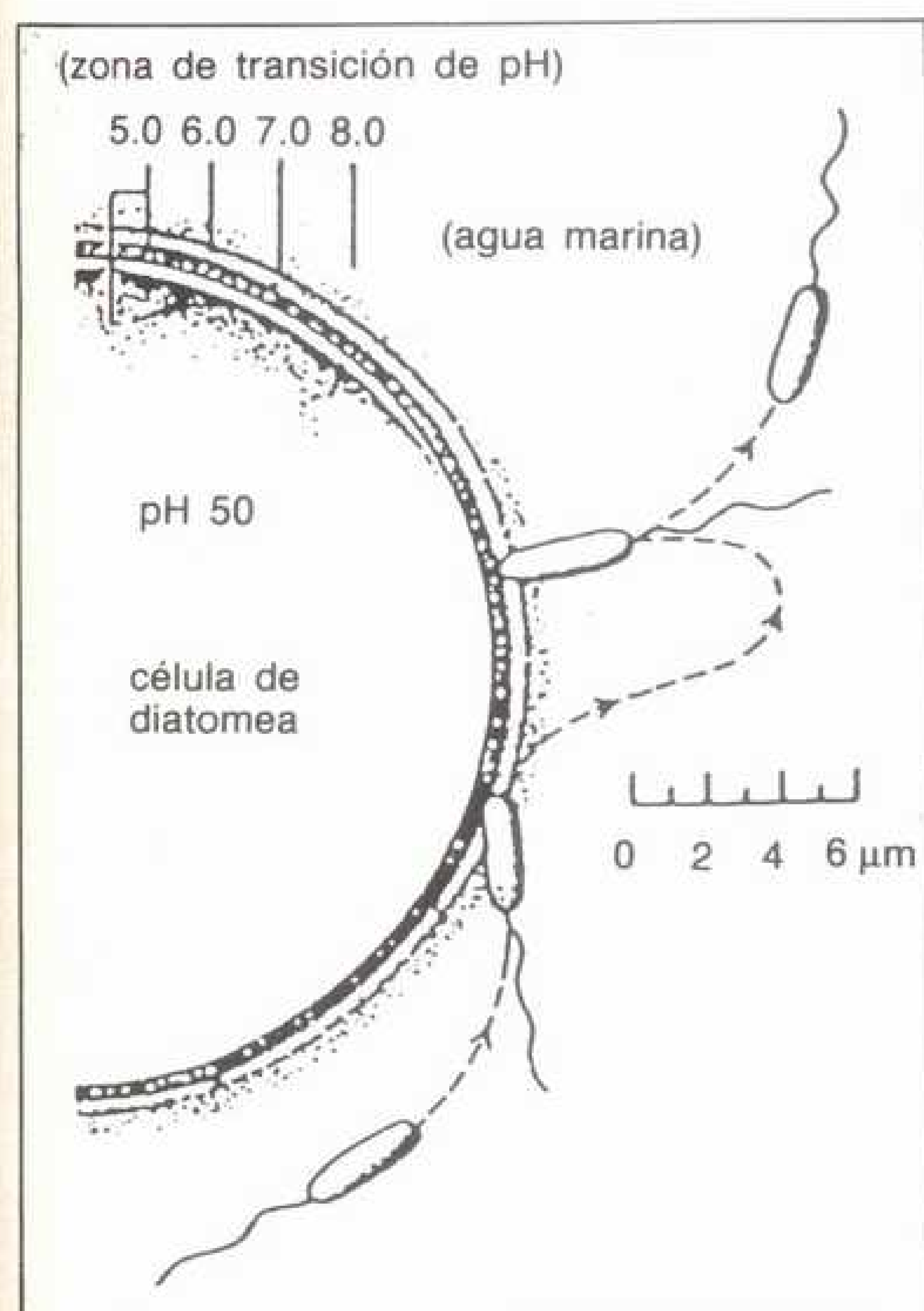


Figura 4. Mecanismo de la repulsión fitoplanctónica sobre el anclaje bacteriano por la excreción de componentes celulares ácidos que forman una zona de transición de pH externa, dentro del agua marina alcalina

En el caso de los mensajeros producidos por bacterias, la acción es doble. La relación entre la bacteria y el alga puede ser positiva. Por ejemplo, muchas algas menores exhiben un aumento del crecimiento en presencia de vitaminas o factores de crecimiento producidos por micro-organismos.[26,27] Sin embargo, algunos estudios sugieren que las bacterias pueden actuar también como consumidores de vitaminas, en cuyo caso competirían con las algas por sus propias secreciones. De manera similar ciertas microfloras epifíticas pueden ejercer una influencia morfogenética sobre ciertas algas. La relación puede ser negativa si el mediador bacteriano es tóxico. Se ha demostrado que las bacterias pueden producir sustancias con una elevada actividad antialgal[28] así por ejemplo, también se ha demostrado que la diatomea Nitzschia *ascicularis* es inhibida por antibióticos de diferentes Vibrio y Pseudomonas y puede llegar a activar la síntesis de tales inhibidores, mediante un proceso similar al de inducción. Éste, es uno de los pocos casos observables de un «feedback» directo.

Relaciones interalgales

Los factores limitantes de la regulación de la población fitoplanctónica, tales como nutrientes, luz, temperatura y salinidad, han sido evocados tradicionalmente para explicar la sucesión de especies en el medio ambiente natural. Su influencia probablemente combinada, tiene mayor importancia en la regulación en mar abierto, siempre que las condiciones no estén, en gran manera perturbadas. No obstante, los metabolitos algales secundarios influencian indudablemente la sucesión de especies fitoplanctónicas, aunque parece probable que a no ser que se produzca una prodigiosa cantidad de metabolito, su influencia en la sucesión vaya aplicada a interaccionar con factores de crecimiento.

En otros casos, los metabolitos algales están implicados en interacciones entre especies algales o poblaciones ya sea «in situ» o «in vitro». En el caso de fitoplancton, el fenómeno más conocido en este campo concierne al antagonismo entre diatomeas y dinoflagelados, que provoca un crecimiento alternado de dichas poblaciones. Una serie de experimentos «in vitro» llevados a cabo por Pincemin[29] mostraron que el crecimiento de la diatomea *Asterionella japonica* era inhibido por la presencia de dinoflagelados como *Coolia monotis* o *Peridinium trochoideum.* Por otra parte, Aubert et al.,[17] han observado que, durante algunas épocas del año y especialmente en primavera, las diatomeas cesan en su actividad sintetizadora de sustancias antibacteriales, fenómeno que corresponde a la densidad máxima de dinoflagelados. Se ha demostrado mediante estudios «in vitro» que la proximidad de *Prorocentrum micans* inhibe la producción de una de las sustancias antibacteriales en *Asterionella japonica.*[20] La sustancia liberada por el dinoflagelado y causante de tal efecto tiene una estructura proteínica y un umbral muy bajo de actividad: 10^{-9} M.

También existen sistemas biológicos multicomponentes. *Prorocentrum micans* produce dos mensajeros antagonistas (fig. 5): uno promueve la sítnesis de pigmentos carotenoides en *A. japonica y Chaetoceros lauderi,* protegiendo así sus ácidos grasos antibióticos de la fotoactivación «in vivo», y la segunda actúa, probablemente, sobre células bacterianas, aumentando el efecto letal de estos antibióticos.[25]

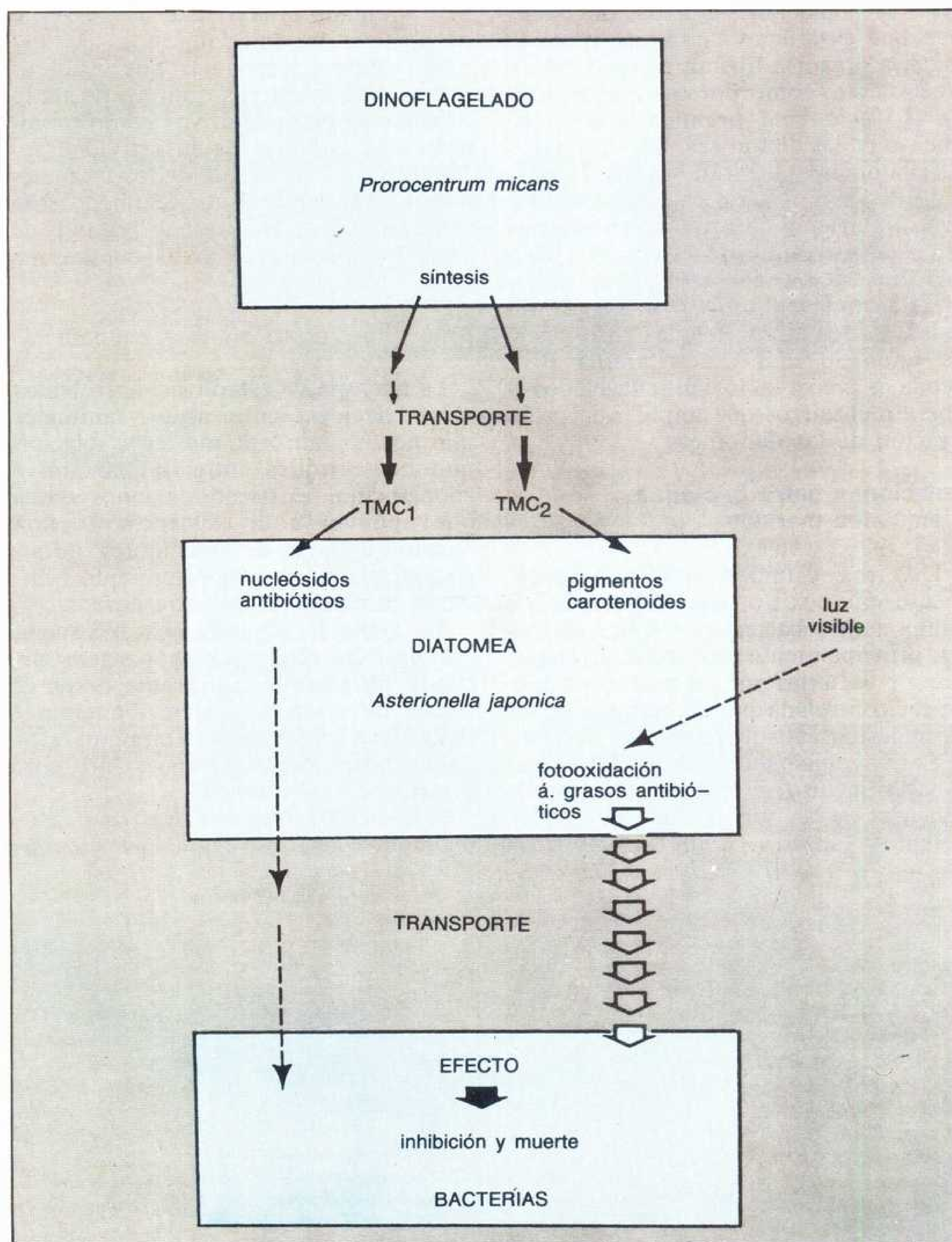


Figura 5. Interacciones entre tres microorganismos marinos: un dinoflagelado, una diatomea y una bacteria (marina o terrestre).

(22) Jorgensen, E.G. 1962. *Physiol. Plant., 15:* 530.
(23) Sieburth, J. McN., 1961. *J. Bacteriol., 82:* 72.
(24) Aubert, J. y Gambarotta, J.P., 1972. *Rev. Int. Océanogr. Méd., 25:* 139.
(25) Gauthier, M.J., 1969. *Rev. Int. Océanogr. Méd., 15-16:* 103.
(26) Ericson, L.E. y Lewis, L., 1953. *Ark. Kemi. 6:* 247.
(27) Gutvieb, L.G., Benzhitski, A.G. y Lebedera, M.N., 1973. S. Genovesa (Editor), Atti del 5.º Colloquio Internazionale di Oceanographia Medica, p. 161.
(28) Berland, B.R., Bain, D.J. y Maestrini, S.Y., 1973. *Mar. Biol. Mar. Oceanogr., 3:* 1.
(29) Pincemin, J.M., 1971. *Rev. Int. Océanogr. Méd. 22-23:* 165.

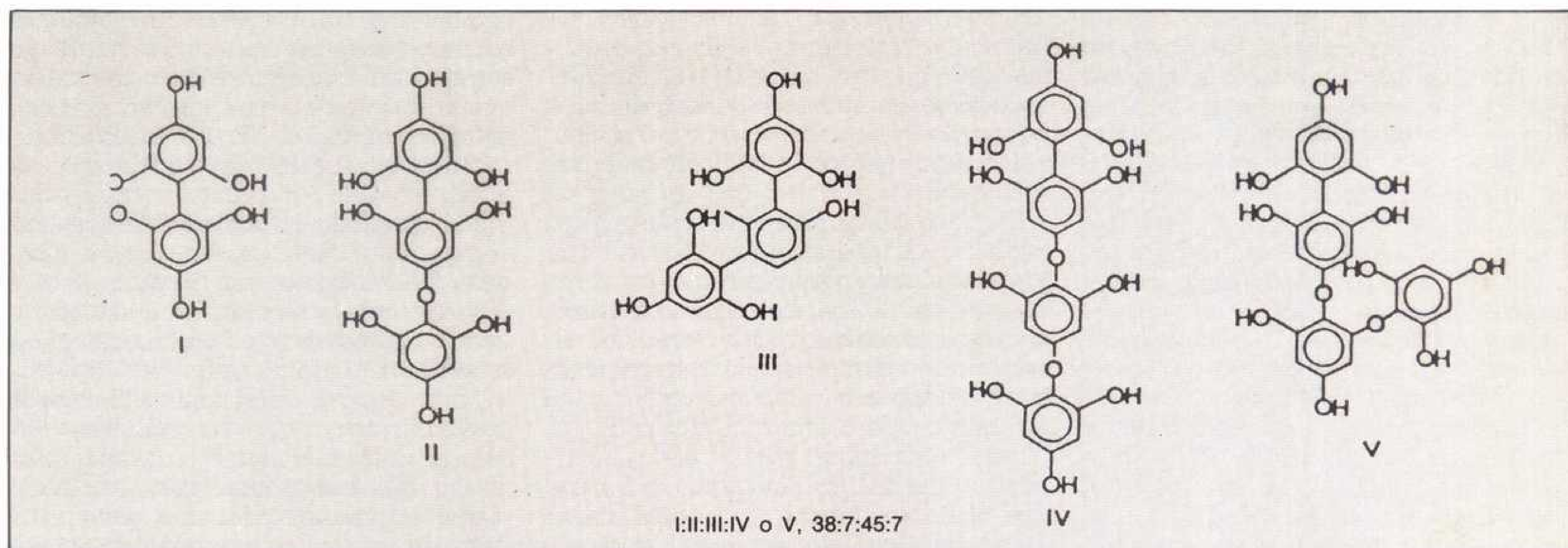


Figura 6. Compuestos fagorrepelentes de las algas **Fucus vesiculosus** *y* **Ascoplyllum nodosum** *contra el caracol* **Littorina littorea.**

En estudios más profundos sobre las interacciones entre bacterias terrestres, diatomeas y dinoflagelados se descubrió que sus poblaciones fluctuaban. Bacterias que proliferan en aguas ricas en materia orgánica liberan mediadores de crecimiento, como por ejemplo vitamina B-12, lo cual promoverá el crecimiento de las diatomeas. Por otra parte, las diatomeas liberarán sustancias antibióticas, como ácidos y polisacáridos, que inhibirán el crecimiento de las bacterias terrestres. El proceso conduciría a una infestación del medio por diatomeas si no fuera porque éstas son inhibidas por los dinoflagelados en un ciclo de unos 30 días. La vitamina B-12 ayuda a crecer a los dinoflagelados y libera mensajeros que impiden la proliferación de las diatomeas.

Relaciones entre bacterias y animales marinos

Diversos estudios muestran claramente que existe una influencia de componentes bacterianos sobre animales, principalmente protozoos. La ingestión de bacterias por los protozoos puede ser controlada por secreciones o por compuestos constituyentes de sus presas. Los organismos unicelulares son capaces incluso de escoger la clase de bacterias de las que se van a alimentar, evitando especies como *Chromobacterium o Serratia,* que contienen productos tóxicos o repelentes.

Por otro lado, muchas observaciones han apuntado la actividad antibacterial de algunos animales marinos: alcionarios, moluscos y esponjas. Sus antibióticos no son selectivos, inhibiendo tanto a bacterias gram-positivas como gram-negativas. Además de su actividad sobre la flora microbiana de los animales huésped probablemente también están implicados en la autopurificación de estos organismos en áreas contaminadas.

Relaciones entre algas y animales

La mayoría de estudios concernientes a las relaciones entre algas y animales marinos se han centrado en la relación puramente trófica entre fitoplancton y zooplancton, existiendo algunos datos que apuntan a la existencia de una relación a través de mediadores químicos, afectando el comportamiento o incluso, la competencia entre ambos.

Sin embargo, algunos ejemplos sugieren posibles efectos antagonistas, indicando un control significante desde el punto de vista ecológico. Fontaine[7] describió un antagonismo entre diversas poblaciones zooplanctónicas, lo cual impedía su coexistencia.

Existe un control similar entre el fitoplancton y algunos organismos superiores, como por ejemplo, moluscos. Las larvas de ostra se alimentan sólo de ciertas algas, cuyo crecimiento depende de la presencia de nutrientes y sustancias tóxicas producidas por otras algas. De forma similar, la tasa de bombeo de las ostras es directamente proporcional a la tasa de algunos hidratos de carbono liberados por el fitoplancton. Asimismo, se ha observado una relación entre la actividad alimentaria de los percebes y la densidad fitoplanctónica local.

Los metabolitos secundarios de algunas algas superiores pueden incluso, influenciar sobre animales marinos. Por ejemplo, el alga parda, *Fucus vesiculosus*[30] inhibe la alimentación del caracol herbívoro *Littorina littorea.* Los compuestos activos son polímeros de floroglucinol (fig. 6) con un Pm comprendido de 30.000 a 300.000, siendo caracterizados por sus datos espectroscópicos y por métodos de degradación química.

Por otra parte, determinadas algas han desarrollado un mecanismo de defensa, al ser atacadas por sus predadores, mediante el cual pasan a ser no digeribles por éstos. Ello se consigue por reacción de sus compuestos fenólicos con aminoácidos, proteínas o carbohidratos, causando un gusto amargo no apetecible para comer.

Por otra parte, de las algas verdes *Caulerpa prolifera* y *Cymopolia barbata*

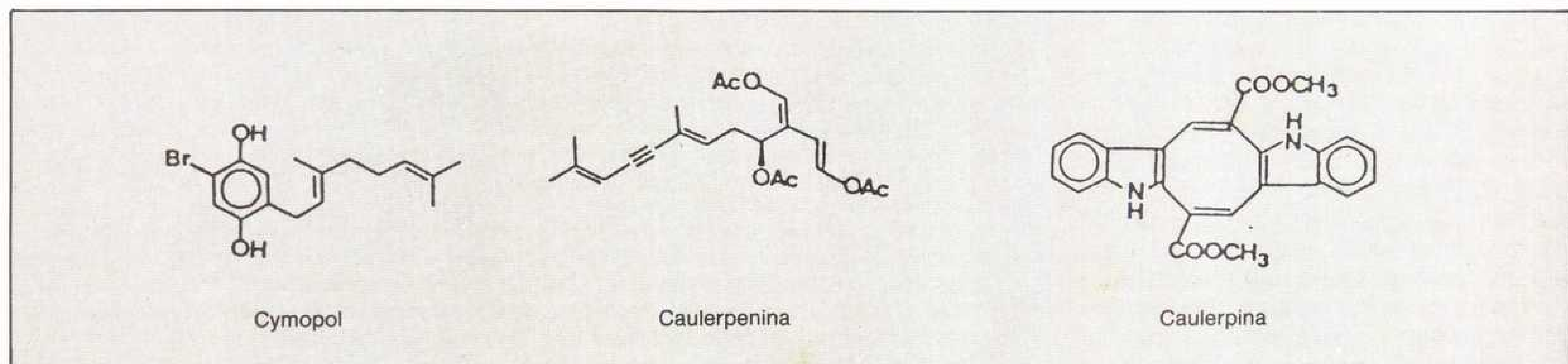


Figura 7. Compuestos fagorrepelentes de las algas marinas **Caulerpa prolifera** *y* **Cymopolia barbata** *contra el erizo de mar* **Litechinus variegatus, L. racemosa.**

(30) Bishop, S.S., McConnell, S.S., Targett, N.M., y Yoder, J.A., 1983. *J. Chem. Ecol. 9:* 817.

se han aislado sustancias inhibidoras de la alimentación para el erizo de mar *Lytechinus variegatus.* A las sustancias biológicamente activas se les ha asignado la estructura indicada en la fig. 7.

Comunicación química entre organismos superiores

La mejora de las técnicas experimentales, a menudo directamente relacionadas con intereses económicos, ha permitido un considerable aumento en los estudios realizados para la comprensión de las interacciones entre animales marinos a través de sustancias químicas. Un buen número de grupos taxonómicos han sido estudiados a raíz de este interés. Las interacciones intraespecíficas y las interespecíficas influencian considerablemente la biología sexual y la evolución social de numerosas especies dentro del equilibrio dinámico de la biocenosis.

Interacciones intraespecíficas

Los compuestos semioquímicos responsables de este tipo de relación se denominan *feromonas,* y actúan de varias formas: pueden causar una alteración temporal del comportamiento, inmediata pero potencialmente reversible («releaser»); inducir una serie de modificaciones a nivel nervioso y endocrino tras una estimulación prolongada («primer»); o conducir a una modificación del fenotipo del individuo receptor cuando actúa en ciertos períodos críticos («imprinting»).

Existen feromonas sexuales, de alarma, seguimiento de pista, agregación, marcaje de territorio, etc.

El papel ecológico más importante lo juegan probablemente los mensajeros sexuales, que controlan la secuencia de movimientos sexuales en un gran número de animales marinos.

Mensajeros sexuales intraespecíficos

Ciertas feromonas sexuales pueden estimular la emisión de estas mismas feromonas en otros individuos de la misma especie; así, se ha descrito este fenómeno para la estrella de mar *Acanthaster plancii* y para el anélido *Platynereis dumerieii.* La atracción de los gametos masculinos por los gametos femeninos, una vez han sido liberados en el agua también depende de sustancias químicas mediadoras. Este hecho ha sido descrito para diversas especies pertenecientes a varios grupos taxonómicos: Hidroideos, medusas y ascidias.[31] Estos compuestos presentan una gran especificidad, tal como se muestra en la tabla 1.

Un fenómeno similar ocurre a nivel de individuos adultos, cuyo encuentro y copulación en períodos reproductivos está asegurado por varias feromonas. La mayoría de los estudios se centran en los crustáceos, en los que la atracción sexual depende generalmente de las ecdisonas, también responsables de la muda, quedando constatado para estos animales que la copulación está, realmente, asociada al período de muda.[32] Unas cuantas especies han sido objeto de investigaciones detalladas:[33] *Homarus americanus, Palinurus vulgaris, Padrygrapsus crassipes, Cancer antennarius.* En todos los casos la atracción química induce un comportamiento sexual específico que conlleva a una secuencia ordenada de movimientos característicos, como movimiento de las antenas y/o pinzas, acercamiento lateral no agresivo, danza precopulativa etc... Consecuentemente las crustaceoecdisonas funcionan, al mismo tiempo, como endohormonas (muda) y como telemediadores (copulación).

Las pautas de comportamiento precopulativo y la comprobación de la existencia de comunicación química se realiza con el aparato descrito[34] en la figura 8.

Los animales, p.e. *Gammarus palustris,* cuyas secreciones quieren ser analizadas, se colocan en las cajas A y los animales cuyas respuestas quieren ser estudiadas se sitúan en el tanque E. Existe un flujo del agua de A a E. Los animales ensayados pueden dejar el tanque E y moverse hacia las cajas filtradoras A. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 2. Se observa que los machos son atraídos hacia todos sus conespecíficos, en períodos de oscuridad, especialmente hacia hembras que

TABLA I
Especificidad de la quimiotáxis en el esperma de los urocordados

Tipo de esperma	Ciona	Styela plicata	Tubularia (hidrozoos)
Extracto de óvulos			
Ciona (9)	+ (> 100)	− (10)	− (5)
S. plicata (4)	− (10)	+ (8)	− (2)
Tubularia (12)	− (5)	− (2)	+ (> 100)

+ , agregación del esperma

TABLA II
Número de machos expuestos a un tipo de secreción

	CAJAS FILTRADORAS CON LAS SECRECIONES DE *Gamarus palustris*		tanques	Diferencias en el número de machos en las dos cajas filtradoras: X^2 (df = 8)	P
A. Presencia de luz	hembras receptores	sin animales			
$\bar{X}$ (SE)	5.7 (0.5)	8.5 (1.0)	5.5 (1.2)	15.2	0.05
B. Oscuridad					
1. hembras receptoras	13.8 (0.6)	4.3 (0.9)	2.8 (0.8)	30.9	0.001
2. hembras no receptoras	10.3 (0.6)	4.0 (1.0)	5.3 (0.2)	29.7	0.001
3. machos	13.3 (0.7)	2.3 (1.1)	4.8 (1.0)	35.6	0.001
	Gammarus mucronatus				
4. hembras receptoras	7.5 (0.8)	4.5 (0.9)	7.8 (0.8)	10.0	0.05

$\bar{X}$ = media, SE = error estándar, df = grados de libertad

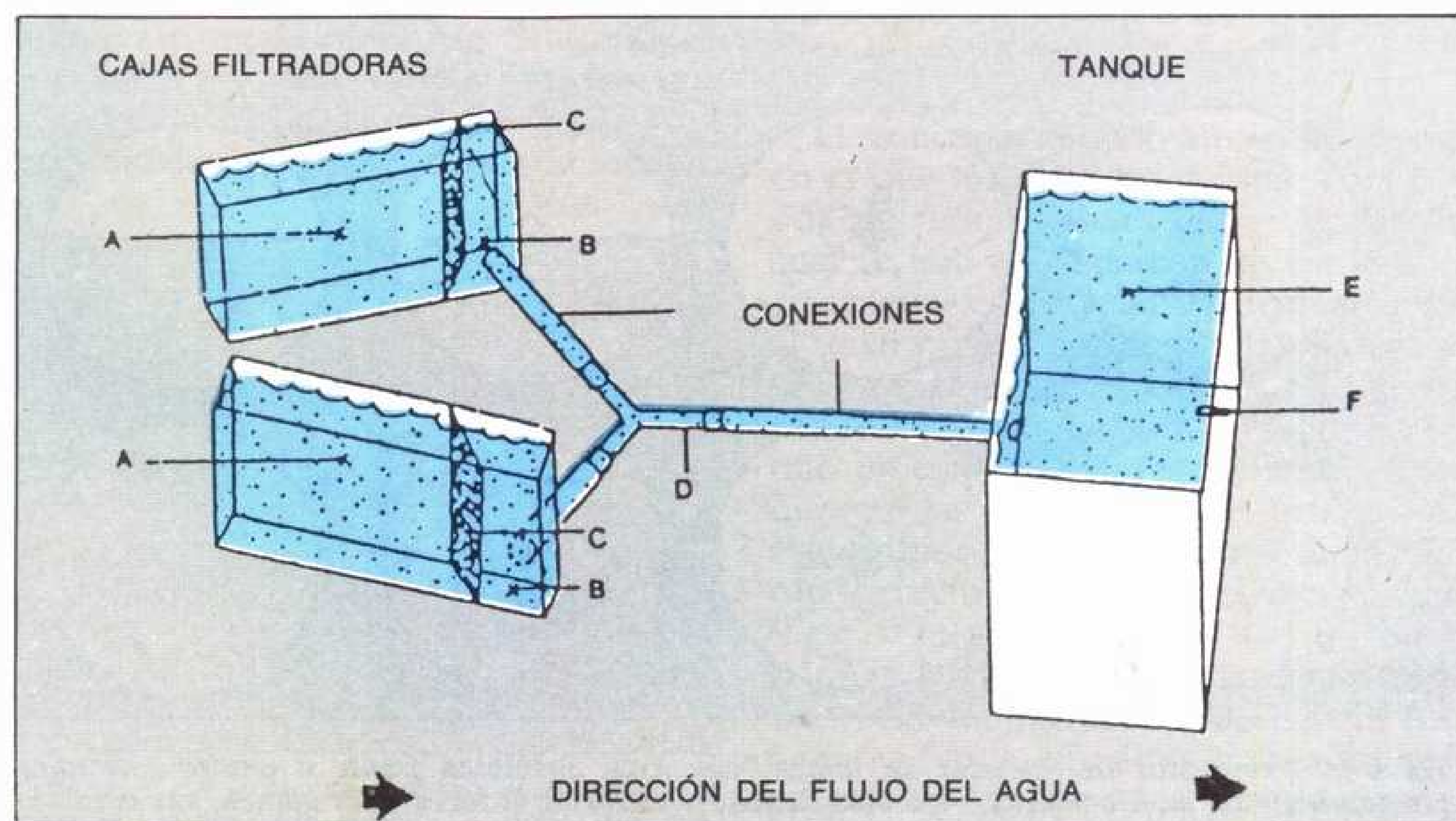


Figura 8. Aparato empleado para probar las respuestas de Gammarus palustris *hacia las secreciones de otros animales.*

(31) Miller, R.L., 1975. *Nature, 254:* 244.
(32) Crisp, D.J., 1974. P.J. Grant y A.M. Mackie (Editors). Chemoreception in Marine Organisms, 1974. Academic Press, Londres, p. 177.
(33) Atema, J. y Engstrom, D.G., 1971. *Nature, 232:* 261.
(34) Borowsky, B., 1985. *J. Chem. Ecol. 11:* 1545.

han realizado recientemente la muda. Por otra parte, no son atraídos hacia hembras de otra especie ni hacia hembras que han realizado la muda, en períodos de luz. Así, las feromonas sexuales son sustancias altamente específicas liberadas en períodos de oscuridad.

La diferenciación sexual puede también ser inducida por mensajeros químicos. En particular sobre gusanos, como *Bonellia fuliginosa* se sabe que sus larvas producen sólo parásitos masculinos si se desarrollan a partir de hembras adultas. El sexo es determinado por la producción de bonelina, feromona manufacturada por estas hembras.[46]

Feromonas de alarma

Las feromonas responsables de este efecto son emitidas, usualmente por individuos atacados o heridos, representando un sistema de defensa de la especie contra predadores. La primera feromona de alarma aislada fue la de un organismo sésil, la anémona de mar *Anthopleura elegantissima*.[35] Cuando una anémona de esta especie detecta la feromona de alarma, responde con una contracción característica, cerrándose a modo de defensa contra el peligro detectado. Otro clásico ejemplo lo muestran los moluscos. Así el caracol de fango *Nassarius obsoletus* puede emitir en el agua una sustancia de peso molecular superior a 100 000, termoestable, presente en su sangre y tejidos, que puede causar una fuerte reacción de alarma en sus congéneres[36] (fig. 9).

Otro ejemplo de secreción de feromona de alarma se encuentra en el opistobranquio *Navanax inermis*[37] segrega en el mucus de pista una mezcla amarillenta de tres compuestos mayoritarios (90 %) identificados como las navenonas A, B y C en la proporción 4:2:1 respectivamente. Los compuestos minoritarios de la mezcla, son los isómeros 3Z, 5Z, 7E, 9E y los homólogos 3-metilados de las Navenonas A y B (fig. 10). Las navenonas, son producidas en una glándula especializada denominada glándula amarilla. Cuando un individuo de la misma especie encuentra la secreción feromonal desvía su recorrido un ángulo mayor de 90º.

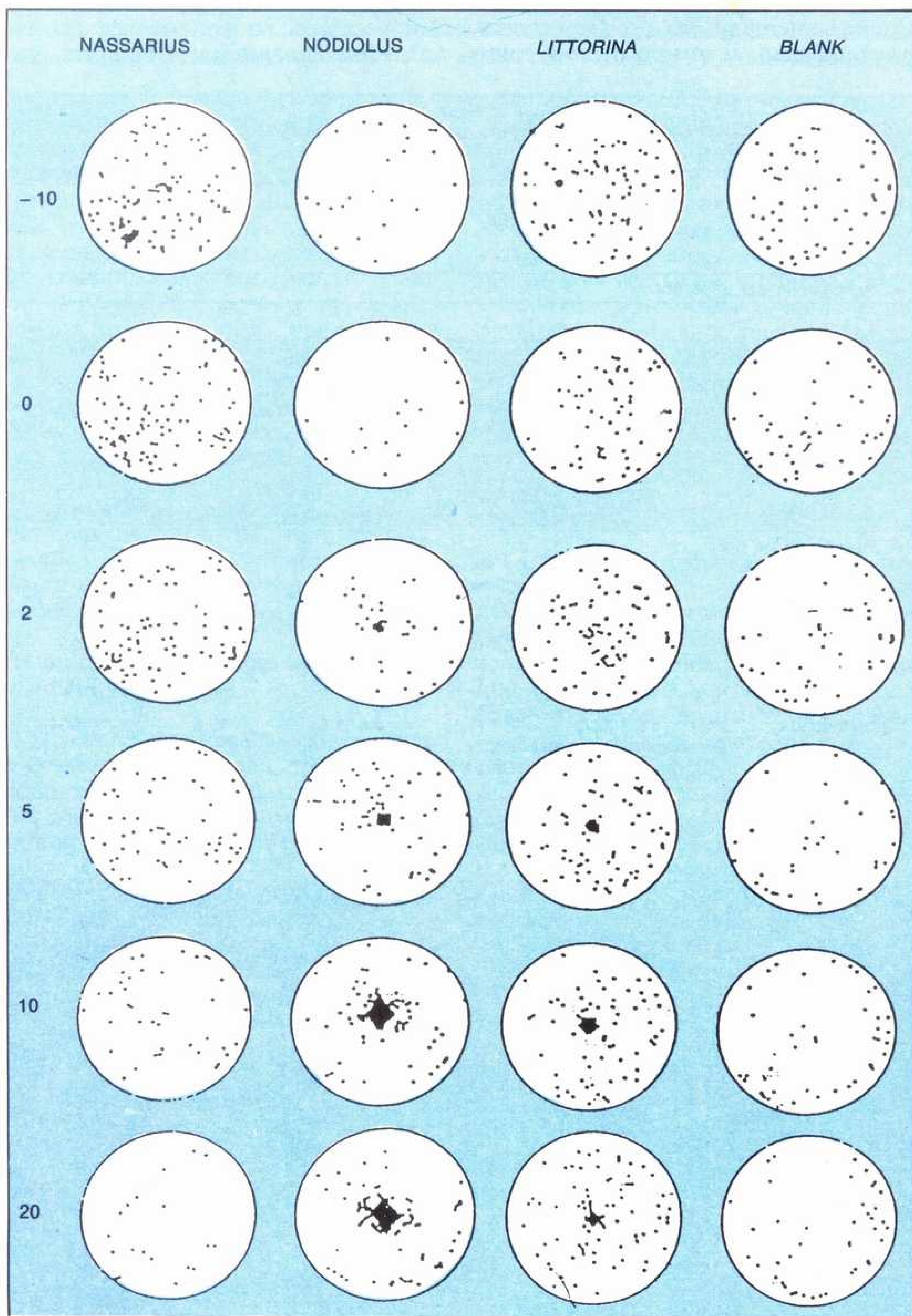


Figura 9. Respuestas del caracol de fango **Nassarius obsoletus** *frente a cuatro estímulos: aplastamiento de* **N. Obsoletus, Nodiolus demisus, Littorina littorea** *y un blanco, sin estímulo. Las manchas indican individuos. Cada círculo indica la suma de cuatro pruebas replicadas. Los caracoles fueron contados a –10, 0, 2, 5, 10 y 20 min. El estímulo fue introducido a tiempo 0, en el centro del círculo (diámetro 35 cm.).*

Fenómenos de pista y migración

El movimiento de ciertos invertebrados bentónicos en relación a un posible refugio o fuente de comida y su reagrupación, puede ser explicado por medio de la existencia de sustancias trazadoras de pista, sólo perceptibles por individuos de una misma especie. Estos mensajeros son depositados en el sustrato mezclados con mucus, como así se ha demostrado para los gasterópodos *Bursatella leachii*[38] y *Siphonaria alternata*.[39]

Las migraciones de los peces tienen una explicación análoga. El salmónido *Salmo alpinus* secreta una feromona capaz de inducir un sentido de la actividad electroencefalográfica de los bulbos olfativos del salmón durante la época de freza cuando éste está inmerso en agua procedente del río en que nació; sin embargo, la actividad es nula cuando se trata de agua recogida fuera del lugar cruzado durante su migración.

Se han estudiado[40] las poblaciones de salmones que viven en los ríos Loksebotten y Salangen, que desembocan al fiordo de Sagfjord. En época de freza se ha comprobado que cada salmón vuelve al río de procedencia. Lo mismo sucede con animales que se han criado en una zona determinada (criadero de Voss) y son posteriormente liberados a mar abierto, volviendo todos al lugar de crianza. Estos resultados implican la emisión de una feromona específica para cada población de salmones, lo cual da idea de la diversidad y especificidad de estas señales químicas.

Interacciones interespecíficas

Los mensajeros interespecíficos, o alomonas, pueden actuar de dos formas: algunos son atrayentes, o aleloesti-

(35) Howe, N.R. y Sheikh, Y.M., 1975. *Science, 189:* 386.
(36) Atema, J. y Stenzler, D., 1977. *J. Chem. Ecol., 3:* 173.
(37) Fenical, W., Sleeper, H.L. y Paul, V.J., 1980, *J. Chem. Ecol. 6:* 57.
(38) Lowe, E.F. y Turner, E.L., 1976. *Veliger 19:* 153.
(39) Cook, S.B. y Cook, C.B., 1975. *Mar. Behav. Physiol. 3:* 147.
(40) Doving, K.B., Nordeng, H. y Oakley, B., 1974. *Comp. Biochem. Physiol., 47:* 1051.
(41) Kleerekoper, H. y Morgesen, J., 1963. *Physiol. Zool., 36:* 347.

mulantes, mientras que otros son repelentes, o alelopáticos.

Alomonas de atracción

Estas alomonas desempeñan una función importante en la actividad de nutrición de los organismos ya que crean un enlace específico de atracción entre presa y predador. También están implicadas en algunas relaciones de comensalismo o simbiosis.

Fenómenos de nutrición

Desde hace 20 años, son muchos los ejemplos aparecidos en la literatura referentes al fenómeno de la quimiodetección de la presa por parte de los animales predadores. Generalmente los mensajeros forman parte de la sangre o de algún tejido de la presa; también pueden ser compuestos emitidos por la piel u órganos excretores. Por ejemplo, es bien conocida[41] la atracción del ester metílico de la leucina, liberado por peces de la familia de los salmones, sobre las lampreas. En el mismo sentido, la combinación de aminoácidos (TAU--ASP-THR-SER-GLU-GLY-ALA) presente en la carne de *Tapes japonica,* induce la búsqueda de comida en la anguila.[41]

También son numerosos los ejemplos de quimiodetección en invertebrados marinos. En celentéreos, el glutation reducido (GLU-CYS-GLY) frecuentemente induce una respuesta alimentiaria que se ha dado en *Hydra littoralis*[42] y en la galera portuguesa *Physalia physalis.* Algunos celentéreos responden a otras aminas: *Cyphastrea ocellina,* a l-prolina, *Montrastea cavernosa,* al ácido glutámico, *Nassarius obsoletus*[44] es atraído por las proteínas de sus presas. El crustáceo *Homarus gammarus*[32] reacciona frente a una mezcla compleja de L-aminoácidos, pero no presenta respuesta frente a la misma muestra de D-aminoácidos, por lo cual dicho crustáceo posee quimiorreceptores quirales.

Simbiosis

Las causas originales de la simbiosis en organismos ya sean en agua dulce o en el mar, han sido largamente investigadas simplemente por el hecho de que los participantes pueden obtener comida o protección por su asociación. En efecto, parece que existe entre ellos un enlace «molecular» establecido a través de mediadores, tal vez producido por el anfitrión y percibido por el comensal o parásito. Así, el anélido poliqueto *Arctonoe fragilis* reconoce, en los bioensayos realizados al agua que ha pasado a través de su anfitrión habitual *Evasteria troscelli.*[45] En el mismo sentido, *Arctonoe pulchra,* un simbionte de lapas, estrellas y holoturias, reconoce a su anfitrión a través de una alomona.[46]

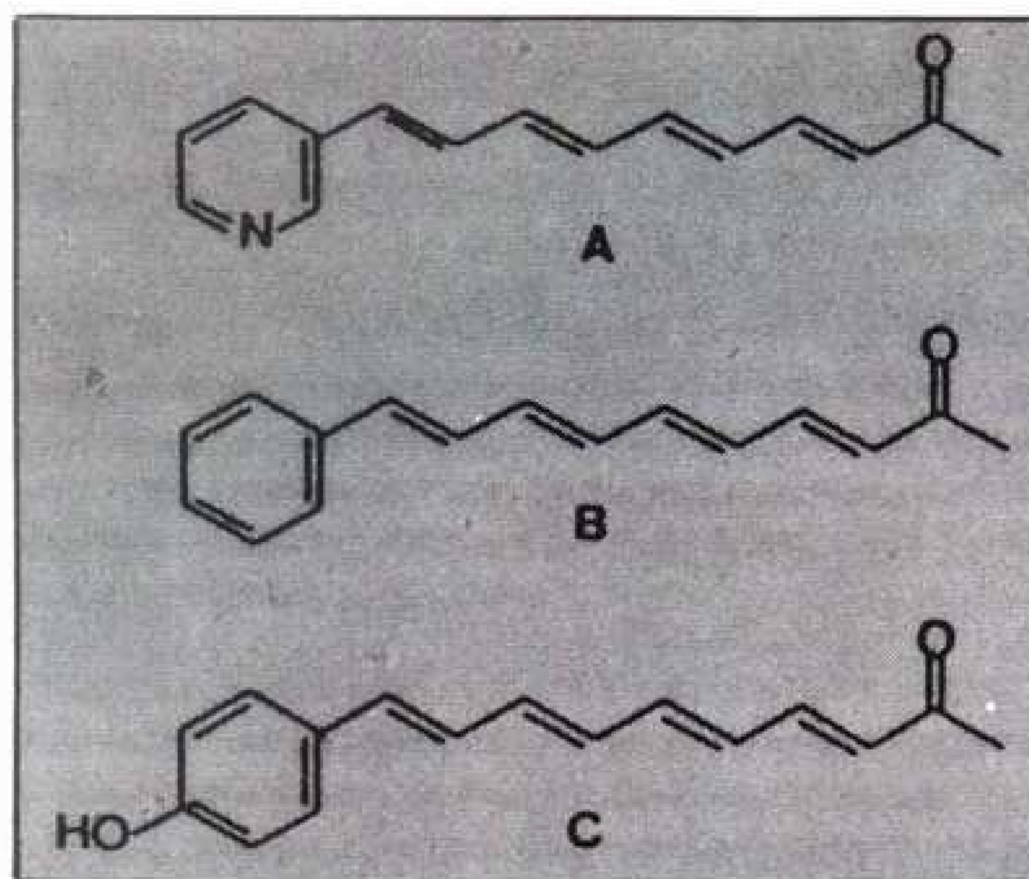


Figura 10. Componentes feromonales mayoritarios de **Navanax inermis.**

Alomonas de repulsión o alelopáticas

El término abarca sustancias de agresión, defensa o ataque liberadas al medio por varias especies y de composición química variable: venenos, toxinas, antibióticos, antigerminativos, antimicóticos, etc... Dichas sustancias desempeñan una actividad incrustante de ciertas sustancias.

De los corales gorgonianos,[47] *Leptogorgia virgulata* y *L setacea* se ha aislado la homarina (fig. 11, I). Esta sustancia inhibe el crecimiento de diatomeas incrustantes *Navicula salinicola.* Tres compuestos estructuralmente relacionados con la homarina, ordenados de más activo a menos activo son el a. nicotínico II, a. picolínico III y la piridina IV. Se han realizado estudios basados en la relación estructura-actividad, encontrándose que la actividad de estos compuestos, en los bioensayos realizados, sugiere que el grupo carboxilo en posición 2 del anillo de piridina es esencial para la existencia de actividad biológica y la cuaternización del átomo de nitrógeno no resulta ser imprescindible.

Otro ejemplo típico de defensa química lo proporcionan los invertebrados bentónicos. Se han descrito un buen número de reacciones de huida o enterramiento iniciadas por la detección de una señal química emitida por predadores. Así, la saponina y ciertos glucósidos esteroidales producidos por la estrella

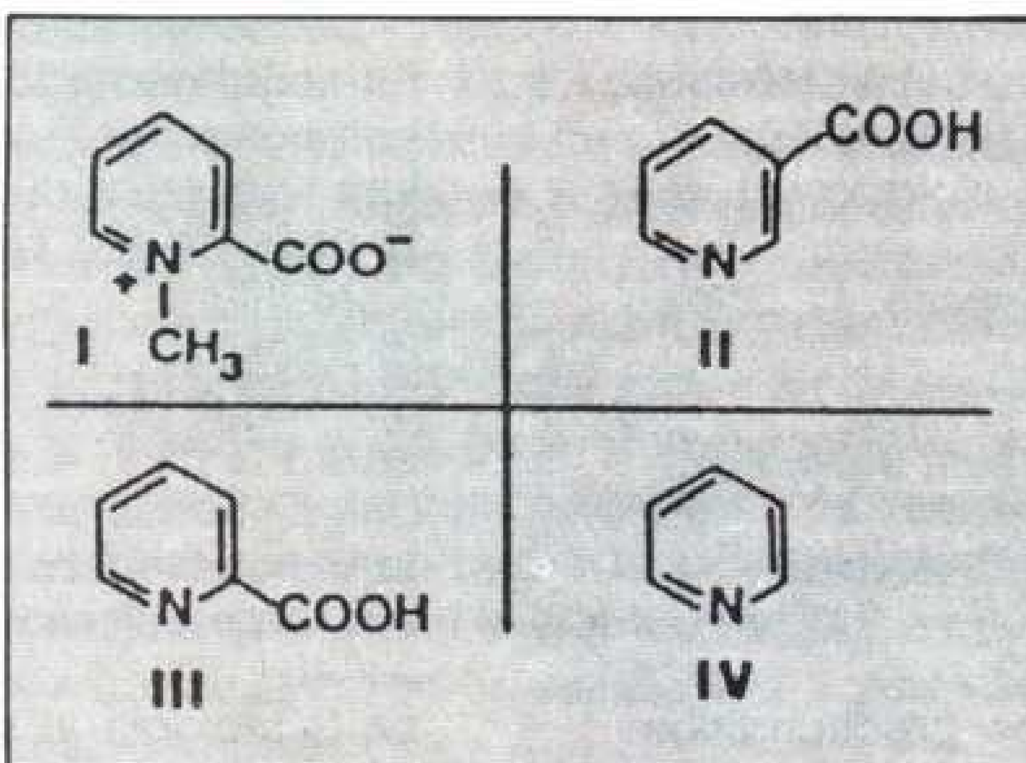


Figura 11. Agentes de defensa química de los corales **Leptogorgia virgulata** *contra las diatomeas marinas* **Navicula salinicola.** *Homarina I, á. picolínico II, á. nicotínico III y piridina IV*

de mar *Marthasterias glacialis* causan una violenta reacción de huida en los moluscos.[32]

Por otra parte, la producción de un mensajero de defensa puede ser provocada por el acercamiento o contacto con un predador. Éste es el caso del gasterópodo opistobranquio *Berthellina citrina,* que libera secreciones ácidas defensivas en contacto con algunas anémonas marinas, peces o crustáceos. Para *Octopus vulgaris,* la defensa está basada, simultánemante, en una huida y en la expulsión de tinta, compuesta por una mezcla de ortoquinonas (8-hidroxi-4-quinolona para *Octopus dofleini*[48]), que inhibe temporalmente el sentido del olfato en la morena.

El nudibranquio *Glossodoris quadricolor*[49] se alimenta de la esponja roja *Latrunculina magnifica* la cual crece en los arrecifes coralinos del golfo de Aquaba en el Mar Rojo. Las sustancias ictiotóxicas aisladas, de dicha esponja, las latrunculinas A y B (fig. 12), se han identificado así mismo en la secreción mucosa del nudibranquio, por lo que no son metabolizadas por el nudibranquio al ser ingeridas. De este modo, *G. quadricolor* es resistente a la Latrunculina B, sustancia altamente ictiotóxica, capaz de aniquilar a los peces a una concentración de 1 mg/l.

Un ejemplo práctico lo constituiría el conocimiento de las feromonas y alomonas de distintos grupos taxonómicos y su utilización para la sustitución de los cebos en las distintas artes de pesca.

Cada método de pesca con cebo (policledos, balanoglosos, *Mytilus, Acmoea digitalis, Osilinus lineatus, Coenobita rugosa, Echinus esculentus,* etc...) lleva a la captura específica de ciertas especies dependiendo del método utilizado. Según el cebo utilizado se capturan especies determinadas, debido a la alta especificidad de las alomonas liberadas.

Concepto cibernético del equilibrio biológico marino

El concepto de un universo marino en el que los equilibrios están controlados por interacciones entre organismos sugiere una analogía con las estructuras cibernéticas. Margalef[50] demostró que al igual que en sistemas cibernéticos, el fenómeno ecológico, como un todo, depende estrechamente del tiempo, puesto que el control ocurre preferentemente durante las fases lentas del proceso. En este sentido, la velocidad del metabolismo y crecimiento de los elementos biológicos juegan un papel capital en el tiempo de adaptación de una población: una bacteria puede responder en unas cuantas horas, mientras que la latencia es mayor en un alga (unos cuantos días), siendo en animales de varios meses.

La fragilidad de la comunicación quí-

(42) Hashimoto, Y., Konosu, S., Fusetani, N. y Nose, T., 1968. *Bull. Jap. Soc. Sci. Fisch. 34:* 78.
(43) Loomis, W.F., 1955. *Ann. N.Y. Acad. Sci., 62:* 209.
(44) Carr, W.E.S., Hall, E.R. y Gurin, S., 1974. *Comp. Biochem. Physiol. 47:* 559.
(45) Davenport, D., 1950. *Biol. Bull., 98:* 81.
(46) Dimock, R.Y. y Davenport, D., 1971. *Biol. Bull., 141:* 472.
(47) Targett, N.M., Bishop, S.S., McConnell, O.J. y Yoder, J.A., 1983. *J. Chem. Ecol. 9:* 817.
(48) Siuda, J.F., 1974. *Martini Lloydia, 37:* 501.
(49) Mebs, D., 1985. *J. Chem. Ecol. 11:* 713.
(50) Margalef, R., 1967. El ecosistema. In Ecología marina. Fundación la Salle de Ciencias Naturales, Caracas.

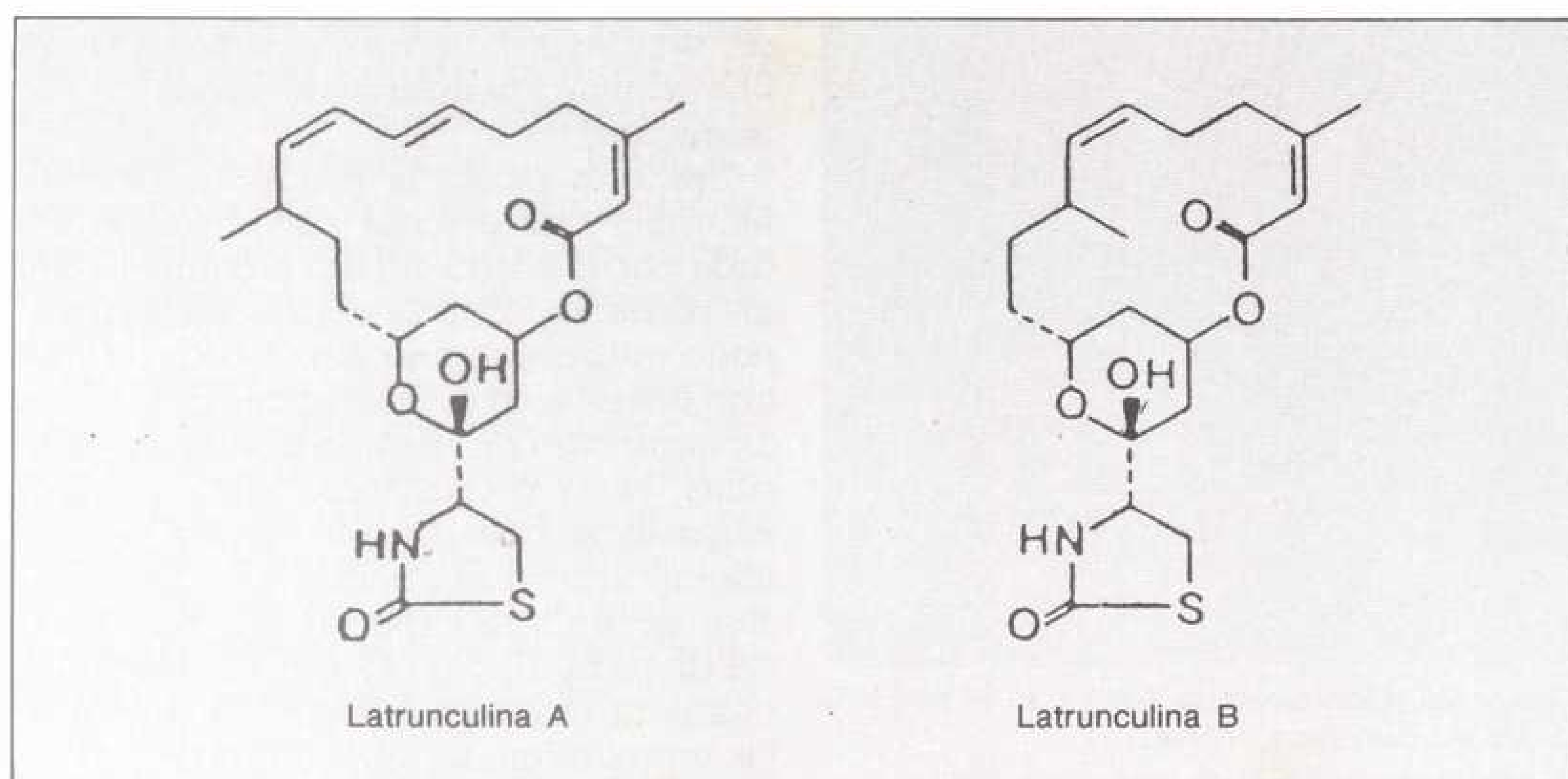


Figura 12. Defensa química del nudibranquio **Glossodoris quadricolor.**

mica, en cuanto a su mecanismo se refiere, debe ser considerada. Cualquier causa (contaminantes) puede aportar cambios en la estructura de los componentes biológicos marinos, resultando en una modificación o destrucción de los metabolitos mediadores o señales.

Este fenómeno puede promover un pronunciado giro ecológico, variando según la actividad de los contaminantes. Desde un punto de vista cibernético, se puede imaginar que estos ataques exógenos pueden obligar a algunas partes del ecosistema a cambiar su programa al alterar sus funciones. El resultado es un desequilibrio extensivo, que conlleva a una reducción en la diversidad y densidad de la red biológica, a través de la desaparición de un cierto número de interacciones, fenómeno observado usualmente en áreas contaminadas distróficamente. Más allá de un cierto umbral, la destrucción de un número máximo de interacciones resulta en la completa desorganización del sistema.

En cualquier caso, se puede asumir que la mayoría de sustancias orgánicas disueltas en el medio marino tienen un propósito biológico más o menos específico. Es necesaria una investigación sistemática tendente a descubrir su posible significado ecológico. En efecto, cualquiera que sea el grado de complejidad del ecosistema en estudio, el descubrimiento de nuevos ejemplos de comunicación química, así como el aislamiento, identificación, síntesis y uso de técnicas de bioensayo adecuadas, aparece como el más prometedor camino hacia la comprensión del equilibrio dinámico, en el que las poblaciones marinas se han mantenido desde largo tiempo. Ello constituye el paso previo y necesario para la evaluación de los efectos reales de la contaminación marina sobre estos equilibrios. ■

Para más información:

• *Techniques in Pheromone Research*, Edited Hans E. Hummel y Thomas A. Miller. Springer-Verlag. Nueva York 1984.
• *Pheromones*, Edited Martin C. Birch. North Holland publishing Company, 1974.
• *Comprehensive Insect Physiology, Biochemistry and Pharmacology*, G.A. Kerkut, L.I. Gilbert 1985. Pergamon Press, Oxford.
• *Evolution, Composition, Interactions and Chemistry of Organic Matter in Seawater*, E.K. Dursma y R. Dawson (editors). 1981. Elsevier Oceanography Series. Nueva York.

INFORMÁTICA

Los transistores de base metálica

Aumentar la rapidez de cálculo de los ordenadores, incrementar el flujo de las redes de telecomunicaciones: éstos son los principales retos a los que la microelectrónica ha de enfrentarse constantemente. En el centro de esta lucha se encuentra el componente electrónico elemental: el *transistor de semiconductor.* Este dispositivo tiene dos funciones que están íntimamente ligadas a nivel de principios físicos, pero que son distintas a nivel de aplicaciones: la amplificación y la conmutación. En el primer caso se aplica una señal en los extremos de entrada del componente, el cual la restituye amplificada a la salida: es un componente analógico. En el segundo caso, el transistor se utiliza como derivación de señales eléctricas: es un componente lógico. Acoplados a otros transistores, estos componentes se ensamblan en arquitecturas complejas en los circuitos integrados, base de los potentes ordenadores actuales. Se realizan en materiales semiconductores, cuya conductividad eléctrica puede variar localmente en diez órdenes de magnitud mediante una simple polarización eléctrica aplicada desde el exterior. Esta grandísima dinámica entre el estado de paso (de poca resistividad) y el estado de no paso (de fuerte resistividad) hace que el transistor de semiconductor sea un candidato ideal para las aplicaciones lógicas. Pero, lamentablemente, su rapidez de funcionamiento está limitada por el tiempo de tránsito de los electrones en los materiales semiconductores empleados. Con el fin de aumentar la rapidez de los transistores han sido exploradas varias vías. Una primera solución consiste en sustituir el silicio, material rey de la industria microelectrónica, por semiconductores en los cuales los electrones son más «ligeros» y, por tanto, se desplazan más rápidamente, como el arseniuro de galio (véase «Los nuevos componentes de la electrónica rápida», en nuestro número de junio de 1985). Otro de los enfoques es inventar nuevos componentes electrónicos fabricados a partir del silicio, cuyas cualidades industriales (estabilidad, tecnología, etc.) no han sido todavía igualadas. Es precisamente este enfoque el que hemos seguido en el Centro nacional de telecomunicaciones, en Grenoble, y con el cual hemos sido los primeros en realizar nuevos transistores de silicio: el transistor de base metálica en 1984 y el transistor de base permeable en 1986 (fig. 1). Estos dispositivos deberían permitir la obtención, en un futuro más o menos próximo, de componentes de silicio que operen por encima de los 50 Gigahertzios, es decir, con un tiempo de conmutación inferior a 20 picosegundos (1 picosegundo = 10^{-12} segundos). Esto representa unas velocidades entre cinco y diez veces superiores a las de los mejores componentes de silicio actuales.

¿De dónde vienen las limitaciones del transistor de simiconductor?

El transistor, tal como fue descrito en 1948 por John Bardeen, Walter H. Brattain y William B. Shockley, de los laboratorios Bell Telephone, está constituido por un cristal semiconductor alternativamente dopado N, luego P, luego N. Este tipo de componente se conoce con el nombre genérico, más preciso, de transistor bipolar. Se dice que el semiconductor está dopado N cuando las impurezas dadoras de electrones han quedado incorporadas en su red atómica, enriqueciéndola en electrones. Se dice que está dopado P cuando las impurezas aceptoras de electrones han sido introducidas en el semiconductor, enriqueciéndolo en «falta de electrones», más corrientemente «huecos». Como los electrones y los huecos tienden a recombinarse, evidentemente dos regiones N y P no podrían coexistir una al lado de otra si no se desarrollase en la interfase N/P una barrera de potencial que retuviera naturalmente cada uno de los tipos de portadores en su región de origen. Esta barrera de potencial separa los dos tipos de portadores mediante una especie de «tierra de nadie», denominada zona desierta. La estructura P/N recibe el nombre *unión* y tiene la propiedad de que al aplicar una tensión eléctrica a sus extremos, deja pasar la corriente en un sentido (unión directa), pero en el otro (unión inversa).

El transistor NPN está formado por dos uniones dispuestas en antiparalelo: de este modo, las dos regiones N están separadas por una barrera de potencial debido a la base P (fig. 2A). En funcionamiento normal, una de las uniones P/N está polarizada directamente: los electrones son inyectados de la región N (el emisor) a la región P (la base). Si la base es bastante fina (típicamente menos de 10 micrómetros), estos electrones podrán atravesar la región P sin recombinarse con los huecos y ser recogidos por la segunda unión, polarizada inversamente (el colector). Aplicando una tensión a la base P, se modula la barrera de potencial entre las dos regiones N y de esta manera se controla la transferencia de los electrones del emisor hacia el colector: es el *efecto transistor.*

El mecanismo de transporte de los electrones a través de la base es la difusión: los electrones inyectados se difunden en la base como lo harían unas gotas de vino en un vaso de agua. El tiempo que emplean los portadores en difundirse a través de la base constituye una de las limitaciones en velocidad que presentan los transistores. Este tiempo de difusión es normalmente de 100 picosegundos para una base de un micrómetro en un transistor optimizado.

Naturalmente, puede pensarse en disminuir el grosor de la base para mejorar el rendimiento del dispositivo; pero la resistencia eléctrica de acceso a la base aumenta y disminuye el flujo de electrones necesario para la conmutación del componente; con ello, se degrada la velocidad de funcionamiento. La plusmarca de velocidad de conmutación en los transistores bipolares parece recaer actualmente en el equipo del profesor Sakai, de la Nippon Telegraph and Telephone, en Japón: 42 picosegundos para una base de 0,3 micrómetros.(1) El empleo de este tipo de componente es, no obstante, difícil, ya que los semiconductores soportan mal la aplicación de tensiones a distancias tan cortas.

Ya desde los años cincuenta, W.B. Shokley apreció las limitaciones del transitor NPN, limitaciones que se deben al tiempo de tránsito y a las resistencias de acceso a la base. Propuso sustituir el material semiconductor de la base por un metal. El enorme contenido en electrones de un metal le confiere una conductividad eléctrica entre cien y mil veces superior a la de un semiconductor que, como su nombre indica, es poco conductor. Este dispositivo recibe el nombre de SMS, de semiconductor/metal/semiconductor (fig. 2B). Cuando se unen un metal y un semiconductor, se produce un fenómeno idéntico al de la unión P/N: en la interfase metal/semiconductor se forma una barrera de potencial que deja pasar la corriente en un sentido y no en el otro. El transistor SMS por tanto está, constituido por dos uniones metal/semiconductor dispuestas en antiparalelo. Como en el transistor NPN, los electrones son inyectados por una de las uniones polarizadas directamente, atraviesan la base metálica y son recogidos por otra unión polarizada inversamente. Es entonces cuando se pone de manifiesto la ventaja de los transistores SMS: realizando bases metálicas cien veces menos gruesas que las bases semiconductoras se obtienen resistencias de acceso mucho mas pequeñas, a la vez que disminuyen considerablemente los tiempos de tránsito en la base. Normalmente, este tiempo es de una centésima de picosegundo para una base metálica de 100 angstrōms (1 angstrōm = 10^{-8} centímetros). Teniendo en cuenta las distintas constantes de tiempos parási-

(1) T. Sakai *et al., Electronics Letters, 19,* 283, 1983.

tas de los dispositivos reales, S.M. Sze y su equipo, de los laboratorios de la Bell Telephone, calcularon tiempos de conmutación diez veces menores en los transistores SMS que en los transistores NPN, para geometrías idénticas.

El gran problema del transistor SMS es su realización práctica. Las primeras estructuras experimentales las realizaron y estudiaron S.M. Sze y su equipo entre 1964 y 1968.(2) Estaban formadas por una punta semiconductora «acabada de afilar y de limpiar», depositada, gracias a un micromanipulador, sobre una película metálica evaporada en la superficie de un semiconductor. Sin embargo, este trabajo no fue posteriormente desarrollado: era evidente que el dispositivo obtenido no era integrable, y la mala calidad de las películas evaporadas en vacío convencional (10^{-10} atmósferas) hacía presumir la presencia de una gran densidad de discontinuidades («agujeros de aguja») en la base metálica. La realización de un dispositivo utilizable, y por tanto hecho de una sola pieza (dispositivo monolítico), pasaba por unas técnicas de deposición del metal *y del silicio.* Pero hay una grave dificultad: el silicio depositado (la parte alta del sandwich de la figura 1A), y por continuidad el metal, han de formar un cristal perfecto. Téngase presente que los semiconductores, al tener pocos portadores libres (electrones o huecos), son extraordinariamente sensibles a los defectos cristalinos, que se comportan como trampas para electrones. Esta sensibilidad es tal, que concentraciones de defectos de 10^{-8} ppm (partes por millón) en el silicio pueden ser detectables e identificadas; esto equivale a un grano de arena negra en una playa de arena blanca. Así pues, un transistor NPN se realiza a partir de un mismo cristal de silicio, y la distinción de las distintas zonas activas (emisor, base, colector) se hace por inyección controlada de átomos dadores y aceptores (difusión o implantación iónica). En cambio, para realizar un transistor SMS es necesario hacer que crezcan unas capas cristalinas de metal y luego de silicio en un sustrato de silicio: se habla entonces de capas epitaxiales.

A principio de los años 1980, el equipo de Tokyo Institute of Technology del profesor Furukawa, simultáneamente con el equipo de la Bell Telephone del doctor Poate, anunciaron la primera epitaxia de un metal sobre silicio.(3) El metal utilizado fue el disiliciuro de cobalto ($CoSi_2$). Este compuesto es un buen conductor eléctrico y posee una estabilidad térmica muy buena, lo cual es importante para la compatibilidad de estas estructuras con la tecnología industrial. La epitaxia resultó posible por la gran similitud de las redes cristalinas de silicio y de $CoSi_2$. Quizá pueda considerarse sorprendente el tiempo que se ha necesitado para producir estas primeras capas. Ello se debe a que la presencia, por pequeña que sea, de impurezas (oxígeno, carbono, etc.) absorbidas por la superficie del silicio inhibe la formación epitaxial del siliciuro, el cual crece entonces de una manera desordenada. Por tanto, fue necesario esperar a que aparecieran las técnicas de deposición bajo ultravacío, con presiones residuales inferiores a 10^{-13} atmósferas, y unos métodos de limpieza de la superficie del silicio que permitieran la obtención de superficies planas y limpias a nivel de la monocapa atómica.

(2) S.M. Sze, *Physics of semiconductor devices,* cap. 11, Wiley, 1969.
(3) S. Saitho *et al., Appl. Phys. Lett., 37,* 203, 1980, J.C. Bean y J.M Poate, *Appl. Phys. Lett., 37,* 643, 1980.
(4) E. Rosencher *et al., Electronics Letters, 20,* 762, 1984.
(5) E. Rosencher *et al., Appl. Phys. Lett.,* en prensa.

Sandwich conseguido

Evidentemente, la publicación de estos resultados significó el inicio de una desenfrenada carrera entre diversos laboratorios (Bell Laboratories, General Electric, Tokyo Institute of Technology...) para realizar los primeros transistores. Pero finalmente, el adelantado fue el equipo dirigido por F. Arnaud d'Avitaya y por sí mismo, del Centre national d'études des telecommunications (CNET), de Grenoble, que, en setiembre de 1984, anunció la realización del primer transistor.(4) La técnica que empleamos es la siguiente. Se evapora cobalto bajo ultravacío, sobre plaquetas de silicio calentadas. Los dos materiales reaccionan y producen, bajo ciertas condiciones, capas cristalinas de $CoSi_2$ sobre el silicio. La capa superior de silicio también se hace evaporar sobre la estructura $Si/CoSi_2$, siempre en ultravacío, para formar el sandwich final. Este tipo de tecnología (deposición bajo ultravacío, limpieza y control de las superficies...) se conoce como epitaxia por chorros moleculares. Las heteroestructuras $Si/CoSi_2/Si$ obtenidas son entonces de una uniformidad muy grande, con interfases abruptas a distancias muy grandes, tal como indica la observación en microscopio electrónico de alta resolución de la figura 1.

El efecto transistor, es decir, la modulación de la corriente entre el emisor y el colector estaba ya bien observado; por tanto, sólo quedaba por comprender el mecanismo de transporte de los electrones a través de la base metálica. Recientemente han podido aportarse ya elementos de respuesta y lo ha hecho nuestro equipo del CNET-Grenoble.(5) Contrariamente al caso del transistor NPN, los electrones inyectados del semiconductor al metal cambian de material: una ley física del sólido indica que sufrirán una discontinuidad de potencial que los acelerará violentamente en el metal. Por tanto, algunos de estos electrones atravesarán la base metálica por inercia, sin sufrir colisiones, mientras que otros, desviados de sus trayectorias, se recombinarán en el metal. Este tipo de transporte, designado con la expresión de *transporte balístico,* está siendo objeto de intensas investigaciones en todo el mundo, y ha sido observado también recientemente en los semiconductores. Sabiendo que el tiempo medio entre dos choques en el metal es del orden de 10^{-14} segundos, un electrón con una velocidad típica de 10^8 centímetros por segundo tendrá una probabilidad importante de atravesar balísticamente la base si ésta tiene un grosor inferior a 100 angströms. Por consiguiente, es comprensible la dificultad de poner de manifiesto el transporte balístico en los metales. Sólo después de la realización y del estudio sistemático de una serie de transistores SMS de espesor de base que varía entre 50 y 300 angströms pudimos poner de manifiesto el transporte balístico en el metal: la distancia de transporte balístico determinada es de 85 angströms, muy próxima a las previsiones hechas más arriba. Sin embargo, surgió un problema mientras efectuábamos el estudio de estas estructuras. La ganancia de los transistores, es decir, la relación entre la corriente recogida y la corriente perdida



en la base, es inferior a la unidad. Por tanto, el transistor no cumple una de sus dos funciones: no amplifica las corrientes. El origen de este fenómeno es muy curioso. Como el electrón es un objeto cuántico (u ondulatorio), posee una determinada longitud de onda característica del material en que se encuentra: algunas decenas de angströms en el silicio y algunos angströms en el metal. Así, al pasar de un material a otro, es reflejado como una onda luminosa en la interfase entre dos medios transparentes, pero de índices ópticos distintos (aire/cristal, por ejemplo). Esta escasa transmisibilidad cuántica es la principal limitación que tienen en la actualidad los transistores SMS. Las investigaciones que se están haciendo para intentar superarla nos han llevado a realizar el transistor de base permeable, la última creación y, hasta el momento, el componente de mayor rendimiento de la línea.

La amplificación nuevamente hallada

El transistor de base permeable (TBP) procede también de las ideas de Shokley. Este dispositivo está formado por una plantilla metálica introducida en una red semiconductora. La barrera de potencial que se forma en las interfases metal/semiconductor rodea las regiones metálicas de una zona desierta, cuyas dimensiones son controladas por la tensión eléctrica aplicada. Cuando las zonas desiertas próximas se recubren, el paso de los electrones por los canales de silicio resulta imposible; así pues, la tensión aplicada permite la modulación de la corriente eléctrica en el transistor (fig. 2C). El transistor TBP pasa a tener todas las ventajas del transistor SMS (escasa resistencia de acceso a la base, muy poco espesor de la base), sin presentar los inconvenientes de la poca transmisibilidad cuántica de este último. De ahí que los cálculos numéricos permitan esperar frecuencias de funcionamiento superiores a 50 Gigahertzios para este tipo de transistor realizado en silicio, y superiores a 200 Gigahertzios para los que se realicen en arseniuro de galio.

También en este caso, el problema inherente al transistor de base metálica es la dificultad de su realización tecnológica. En primer lugar, las zonas desiertas se extienden a menos de 0,5 micrómetro, por lo que la anchura del canal semiconductor ha de ser de este mismo orden de magnitud. Estas dimensiones sólo son accesibles a técnicas pesadas, como la litografía electrónica o de rayos X. Por otra parte, y una vez más, la estructura ha de ser cristalina, lo que requiere unos elaborados medios de epitaxia. Los primeros transistores TBP los realizaron C.O. Bozler y G.D. Alley, en el Lincoln Laboratory del Massachusetts Institute of Technology (MIT), a principios de los años 1980.[6] Sus componentes fueron fabricados por deposición de arseniuro de galio (GaAs) sobre una plantilla de tungsteno (w) evaporado sobre un sustrato de GaAs. Las prestaciones obtenidas son ya muy prometedoras: transistores que pueden operar hasta 150 Gigahertzios y que ya han sido realizados. Estas prestaciones deberían todavía mejorarse a condición de obtener estructuras cristalinas entre GaAs y un metal, lo que aún no ha sido posible. Para la fabricación del transistor TBP, esta vez en silicio, la utilización del sistema cristalino $Si/CoSi_2/Si$ es, sin duda, ideal. Aprovechando los resultados de los ensayos llevados a cabo por equipos del profesor Shiraki, de los laboratorios de Hitachi, y del profesor Furukawa, del Tokyo Institute of Technology,[7] realizamos recientemente en el CNET –Grenoble el primer transistor de base permeable epitaxial empleando la heteroestructura $Si/CoSi_2/Si$.[8] También en este caso, el resultado ha sido posible acoplando los potentes medios tecnológicos que son la epitaxia por chorros moleculares y el fotolitograbado. La fotografía de la figura 1B muestra uno de estos transistores TBP con canales de silicio de 1 micrómetro, pero ya están consiguiéndose canales de menos de 0,5 micrómetro. Queda ahora por verificar que el transistor de base permeable mantiene sus promesas de rapidez de conmutación.

Las investigaciones sobre transistores con base metálica se desarrollan en dos direcciones diferentes. Algunos laboratorios (Bell Laboratories, UCLA, General Electric, IBM...) están intensificando sus esfuerzos en la investigación fundamental sobre las heterostructuras silicio/metal: investigación de nuevos siliciuros epitaxiales, comprensión de los mecanismos de la formación de la barrera Si/metal, disminución de la reflexión cuántica, supraconductividad en las superredes Si/metal, transporte balístico... Estas heterostructuras son un

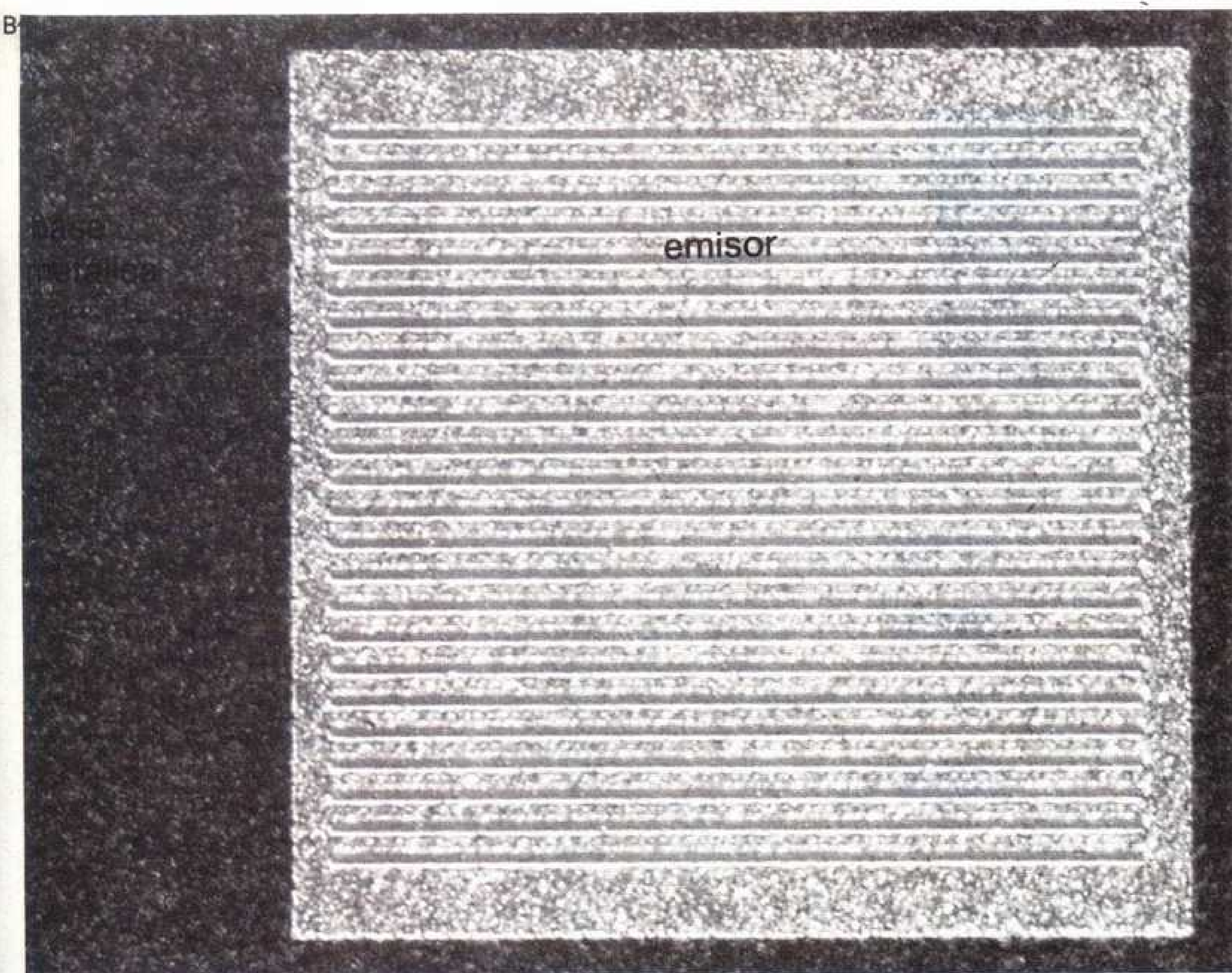


Figura 1. El transistor de semiconductor es el componente electrónico elemental de los más potentes ordenadores actuales. Está formado por una «base» que controla y amplifica la transferencia de electrones entre un «emisor» y un «colector». Su velocidad de funcionamiento puede aumentarse sustituyendo el material semiconductor de la base por un metal: se obtiene entonces un transistor SMS (semiconductor/metal/semiconductor). El gran problema del transistor SMS es su realización práctica. En efecto, es necesario que el conjunto del sandwich silicio/metal/silicio forme un cristal perfecto. El primer transistor SMS se realizó en 1984. Lo consiguió el equipo dirigido por F. Arnaud d'Avitaya y E. Rosencher, del Centre national d'études des télécommunications, de Grenoble. El metal utilizado es el disiliciuro de cobalto ($CoSi_2$). Es un buen conductor eléctrico, térmicamente estable, y cuya red cristalina es muy similar a la del silicio. La fotografía A representa una observación al microscopio electrónico de transmisión a alta resolución (HRTEM) de una estructura que tiene un grueso de metal $CoSi_2$ de 70 amgströms entre dos capas de silicio. Si bien el transistor SMS realizado a partir de esta estructura es, en realidad, más rápido, no obstante no cumple una de sus dos funciones fundamentales: no amplifica las corrientes. Esto ha hecho que los investigadores hayan diseñado otro tipo de transistor de base metálica: el transistor de base permeable, o TPB. En este transistor, la base continua ha sido sustituida por una plantilla metálica. El primer transistor TPB que utilizó una heterostructura $Si/CoSi_2/Si$ fue realizado en el Centro de Grenoble del CNET muy recientemente. En la foto B se muestra por contraste de relieve, esta plantilla metálica que, de hecho, está incluida en una red semiconductora (el transitor está visto desde arriba). Los canales de silicio tienen aquí un grueso de 1 micrómetro. Este resultado ha sido posible acoplando potentes medios tecnológicos como la epitaxia por chorros moleculares y el fotolitograbado. (Fotos CNET/Foto A: Cécile d'Anterroches.)

(6) C.O. Bozler, G.D. Alley, *IEEE Trans. Electron Devices, 27,* 1128, 1980.
(7) K. Ishibashi, S. Furukawa, *IEEE Trans. Electron Devices, 33,* 322, 1985.
(8) E. Rosencher *et al., Electronics Letters, 22,* 699, 1986.

Una base metálica de 85 angströms para el transporte sin colisión de electrones acelerados.

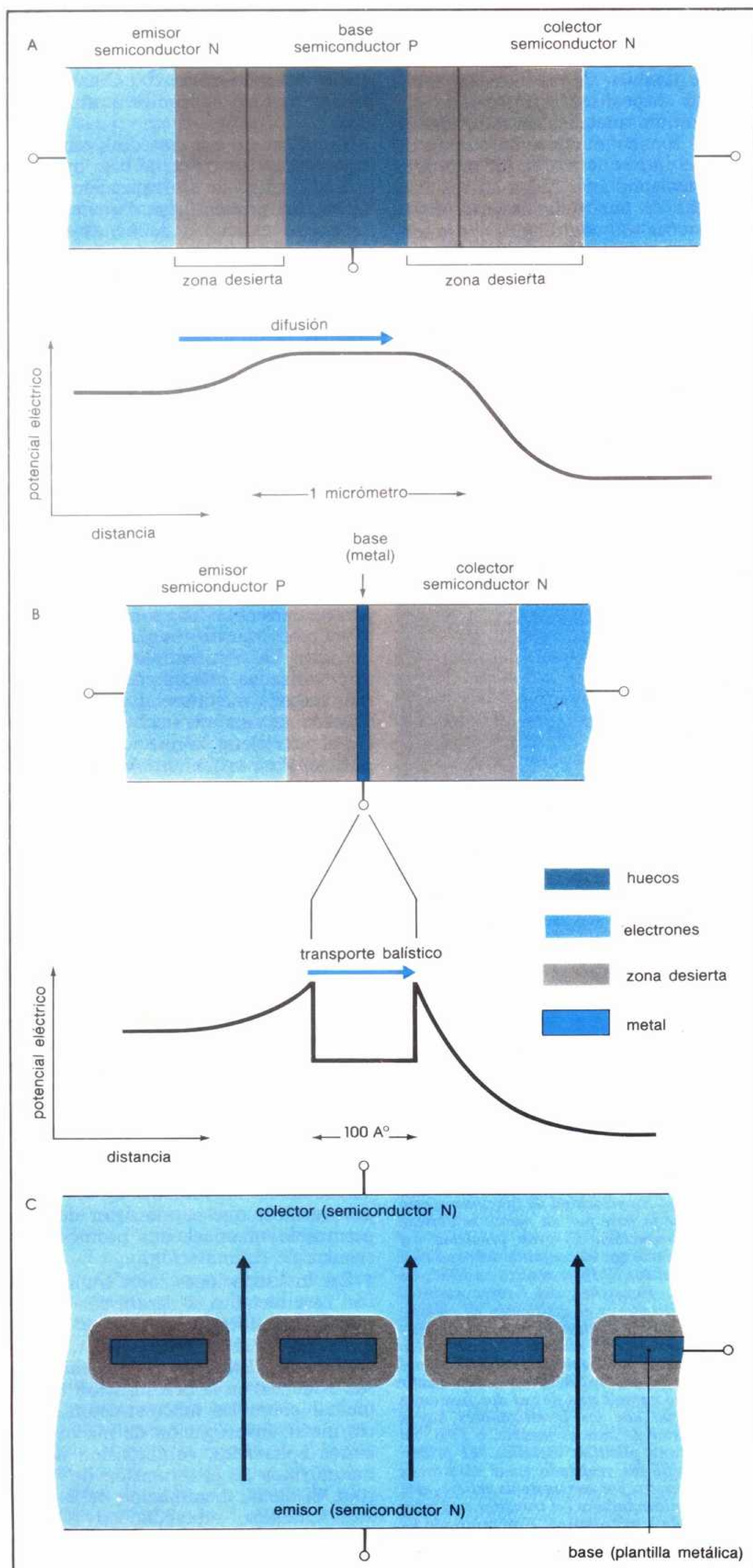


Figura 2. En su principio, la diferencia de funcionamiento entre el clásico transistor de semiconductor y los transistores de base metálica (más rápidos) es sencilla. El primero (A) está constituido por un cristal semiconductor alternativamente enriquecido en electrones (dopado N), en la «falta de electrones» o huecos (dopado P) y también en electrones (dopado N). La barrera de potencial que separa las regiones N y P mediante zonas desiertas impide que electrones y huecos se recombinen. Los electrones son emitidos desde una de las regiones N (el emisor) a la región P (base) por aplicación de un potencial electrónico. Entonces, los electrones se difunden a través de la base, cuyo grueso es del orden del micrómetro. A continuación, son recogidos por la segunda unión N/P. El tiempo que emplean los electrones para atravesar la base (normalmente 100 picosegundos para una base de 1 micrómetro) es tanto más pequeño cuanto más fina es la base. Sin embargo, al reducir este espesor aumenta la resistencia eléctrica de la base y se reduce el flujo de electrones necesarios para la conmutación del transistor, con lo cual se degradan sus prestaciones. Esto indujo a sustituir esta base semiconductora por una base metálica y, de este modo, formar el sandwich monocristalino semiconductor/metal/semiconductor, que da su nombre al transistor SMS (B). La gran densidad electrónica del metal le confiere una conductividad de cien a mil veces superior a la de un semiconductor. Por tanto, es posible reducir el grueso de la base hasta situarlo por debajo de los 100 angströms y obtener unos tiempos de tránsito despreciables (10^{-14} segundo), a la vez que se conserva una resistencia de base muy débil. Los electrones inyectados en el metal son acelerados y atraviesan la base por inercia: esto es el transporte balístico. Finalmente, el transistor de base permeable (TBP) está formado por una plantilla metálica insertada en un material semiconductor (C). La barrera de potencial que se forma en la interfase metal/semiconductor rodea la base metálica de una zona desierta prohibida a los electrones. Una tensión aplicada a la plantilla metálica modula esta zona prohibida y así controla el flujo de electrones en los canales semiconductores. Y un detalle curioso: este dispositivo es, en realidad, conceptualmente equivalente al triodo de vacío de nuestros padres; en cierto modo es una especie de triodo microscópico de estado sólido.

instrumento inestimable de estudios fundamentales, pero las perspectivas de aplicaciones industriales son aún lejanas.

Estos plazos son frecuentes en electrónica. No hay que olvidar, a título de comparación, que el principio del transistor con puertas aislada (MOSFET) ya fue enunciado en 1930, mientras que su primera realización data de 1960.

Otros laboratorios (principalmente japoneses, pero también el MIT, en Estados Unidos) centran sus esfuerzos en el desarrollo del transistor de base permeable de silicio. Las perspectivas de futuro hay que situarlas a plazo medio (unos diez años), pero estos estudios necesitan unos grandes medios tecnológicos: salas estériles con muy buenos equipos, nanolitografía... Sin embargo, las investigaciones deberían permitir que se consiguieran, al menos, unos componentes electrónicos que operaran por encima de los 50 Gigahertzios, avalado por el juicio práctico y salvando la observación del industrial: «Su dispositivo es perfecto, pero ¿saben hacerlo con silicio?

Emmanuel Rosencher.

La genética al servicio de los carnés de identidad

Hace apenas un año, un equipo de investigadores británicos dirigido por Alec J. Jeffreys, de la universidad de Leicester, presentaba en la célebre revista *Nature* un estudio por lo menos sorprendente.[1] El asunto se origina por un problema de inmigración. Un joven de Ghana que deseaba reunirse con su madre residente en el Reino Unido vio rechazado el derecho de entrada por los servicios británicos de inmigración. Los exámenes habituales de grupo sanguíneo, de los factores rhesus y otros «marcadores» de la sangre no permitieron determinar si el chico era el hijo o el sobrino de la mujer que pretendía ser su madre. Sólo el análisis directo de la información genética, contenida en la molécula de ADN, de uno y otra, permite establecer la filiación sin ambigüedad. La autorización de inmigración fue entonces concedida.

Por primera vez, las autoridades de un país recurrían a las modernas técnicas de la biología molecular para identificar a un individuo accediendo al corazón mismo de su material genético. Este ejemplo ilustra una realidad: el establecimiento del carné de identidad genético de un individuo se ha hecho posible. En realidad, hay toda una panoplia de métodos de análisis directo o indirecto de la molécula de ADN que permiten realizar la «huella genética» de un ser vivo. Las aplicaciones son múltiples y atañen tanto a las bacterias, las plantas y los animales como al hombre. La aparición de sociedades privadas especializadas en la identificación genética, tales como Locus en Francia, Proteus y Protein Data Base en Estados Unidos, es un signo que no engaña acerca de la evolución en marcha en este sector.

El «código de barras» de los genetistas

Identificar un ser vivo supone que sea diferente de otro ser vivo. En realidad, a excepción de los auténticos gemelos, todos los individuos de una misma especie son genéticamente distintos. Dicho de otro modo, hay una gran diversidad genética en el seno de cada especie: es lo que se llama el polimorfismo genético. La comparación entre individuos se ha hecho largo tiempo de manera indirecta, con ayuda de «marcadores», testigos de la diversidad genética. En el hombre, los marcadores más clásicos son los grupos sanguíneos y los grupos HLA (de histocompatibilidad) propios de cada individuo y que se caracterizan por unos anticuerpos específicos. Un conjunto de proteínas, como ciertas proteínas de la sangre o los enzimas, son también excelentes marcadores del polimorfismo genético: son identificadas por el método llamado de electroforesis unidimensional. El resultado se asemeja con una especie de «código de barras» para genetistas, característico de cada individuo (véase figura).

Los marcadores, utilizados rutinariamente de manera muy eficaz desde hace varios decenios, han proporcionado algunas informaciones esenciales especialmente en genética de las poblaciones y en clínica humana. Pero no siempre dan suficiente razón de la diversidad natural de los seres vivos. Desde 1975, un nuevo método aún poco conocido fuera de los laboratorios, la electroforesis sobre gel en dos dimensiones, ha sido elaborado para estudiar el conjunto de las proteínas de una muestra (véase figura).[2]

Casi simultáneamente, la emergencia de la ingeniería genética hacía que la molécula de ADN fuera accesible al análisis. Desde entonces se hacía posible comparar a los individuos directamente al nivel mismo de su material genético. Este cambio de situación se debe esencialmente al descubrimiento de enzimas particulares, los enzimas de restricción, especies de «tijeras» capaces de cortar el ADN en unos lugares muy precisos, y a la obtención de «sondas», verdaderos anzuelos que descubren determinados fragmentos cortados entre millares de los demás. También ahí es necesaria una electroforesis unidimensional para separar previamente los millares de fragmentos obtenidos (véase figura).[3]

¿Para qué sirve el establecimiento de un carné de identidad para una planta o un animal? Tomemos el caso de las simientes vegetales. Los establecimientos Meuniers cuentan ya con una «clave de identificación» que les permite controlar sus lotes de trigo, clave que se basa en el análisis de las proteínas de reservas de los granos por electroforesis unidimensional y que sirve para descubrir los trigos utilizables, por ejemplo, para la panificación o la preparación de pastas alimentarias. Verdad es, pues, que las variedades de semillas vegetales inscritas en los catálogos oficiales nacionales estarán caracterizadas cada vez con más frecuencia por este tipo de técnicas, mucho más fiables que la simple descripción morfológica. Además, se hace igualmente más fácil controlar la impureza de los lotes de semillas. Las variedades híbridas de maíz, por ejemplo, son fruto de una fecundación controlada por el experimentador. Pero he aquí que en un campo siempre puede darse la polinización incontrolada de algunos pies de maíz, acarreando una heterogeneidad de semillas y una pérdida de rendimiento de la cosecha para el agricultor. La presencia de semillas indeseables se detecta hasta ahora por medio de cultivos en invernadero o fuera de tiempo en el hemisferio sur (Argentina, por ejemplo). También aquí, los análisis electroforéticos resultan muy interesantes, pues ofrecen la posibilidad de comprobar rápidamente la producción, tres semanas después de la fecundación en el maíz.

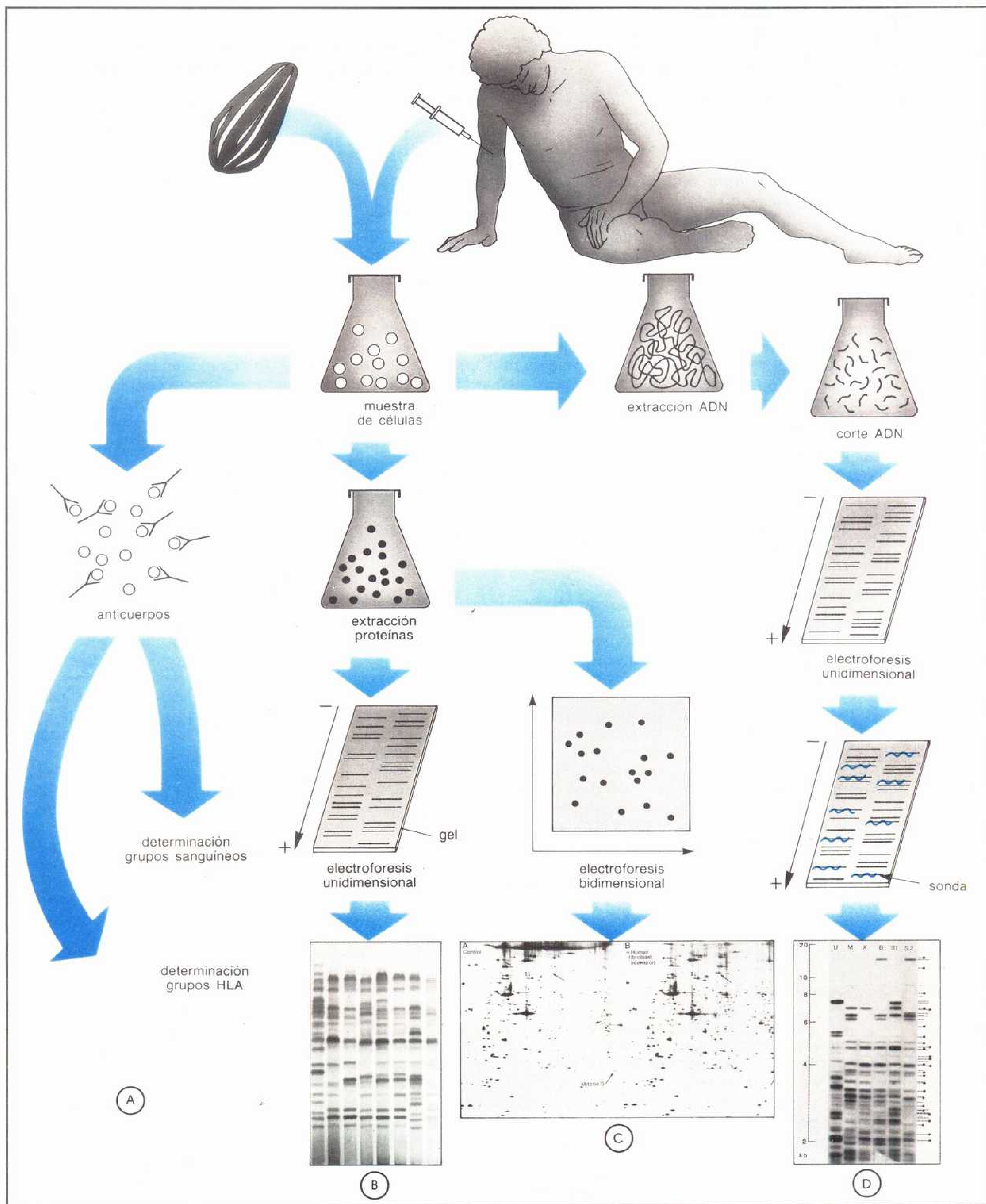
Plantas y animales tienen un carné de identidad

En el campo animal, las aplicaciones también son múltiples. A título indicativo, el Instituto Francés de Investigación para la Explotación del Mar (IFREMER) acaba de publicar un catálogo con las características electroforéticas de las principales especies de peces marinos. Con estos datos resulta posible controlar eventuales fraudes en la introducción de pescados congelados en Francia.[4]

Por otra parte, en Estados Unidos, la apicultura está amenazada por unas abejas muy agresivas, denominadas «matadoras». Desgraciadamente, es imposible distingirlas *de visu* de las demás. Las técnicas bioquímicas ofrecen ahora una ayuda preciosa a los criadores americanos que les permite identificar a las abejas matadoras, cuyos enjambres pueden eliminar.[5] Los gerentes de zoológicos se muestran también muy interesados, ya que estos métodos les ofrecen la posibilidad de estimar la diversidad genética de las poblaciones en cautividad y de intentar mantenerla evitando los cruces consanguíneos que, con el tiempo, arriesgan a acarrear la extinción de las especies.[6]

En los ejemplos citados, las técnicas utilizadas son relativamente poco costosas, pues se trata de electroforesis de proteínas en una dimensión. Más reciente y más oneroso, el empleo de sondas de ADN está por el momento reservado sobre todo al hombre. Hemos visto al principio de este artículo cómo han permitido el establecimiento de una filiación sin ninguna ambigüedad. Las sondas utilizadas aquí reconocen pequeñas secuencias varias veces repetidas en la molécula de ADN; ahora bien, el número y el tamaño de estas secuen-

(1) A.J. Jeffreys *et al.*, *Nature, 371,* 818, 1985.
(2) M.M. Galteau, G. Siest, *Progrès récents en électrophorèse bidimensionelle,* Presses universitaires de Nancy, 1986.
(3) L.S. Lerman (ed.), *DNA probes,* Current communication in molecular biology, Cold Spring Harbor Laboratory, 1986.
(4) P. Durant *et al., Catalogue électrophorétique des poissons commerciaux,* IFREMER, 1985.
(5) H.G. Hall, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 83,* 4874, 1986
(6) A.F. Read, P.H. Harvey, *Nature,* 322, 408, 1986.



(7) A.J. Jeffreys *et al., Nature, 314,* 67, 1985; P. Gill *et al., Nature, 318,* 577, 1985; (8) P. Newmark, *Nature, 321,* 104, 1986.

cias, llamadas «minisatélites», son esencialmente característicos de cada individuo. Habitualmente, una gota de sangre fresca basta para el análisis de los minisatélites, pero el equipo británico ha mostrado que la técnica puede ser aplicada a manchas viejas de sangre de varios años, a cabellos o a esperma recogido en tomas vaginales: clarísimamente, resulta posible confundir definitivamente un sospechoso de violación o de homicidio por su «huella genética».[7] El poder e interés de estas pruebas han llevado ya al gigante británico ICI (Imperial Chemical Industries) a proponer su comercialización.[8] Sin embargo, al presentar este tipo de exámenes unas dificultades técnicas impor-

Son posibles diversos métodos para «visualizar» el contenido hereditario de un individuo a partir de una muestra (gota de sangre o grano vegetal). El análisis puede atenerse a la identificación de algunos «marcadores» característicos de cada individuo. Así, en biología humana, la identificación de los grupos sanguíneos o de los grupos HLA se practica corrientemente con la ayuda de anticuerpos específicos de cada grupo (A). Algunas proteínas, como las de la sangre o los enzimas, también son excelentes marcadores. Son reveladas por medio de electroforesis unidimensional (B): la muestra analizada es triturada en una solución acuosa a fin de extraer las proteínas de las células. El extracto se deposita luego sobre un soporte poroso (gel de almidón o de acrilamida) colocado entre dos electrodos. Al estar las proteínas cargadas eléctricamente, van a emigrar y a separarse en función de su carga eléctrica. Sus posiciones relativas son visualizadas por diversos procedimientos (coloración, radiactividad, revelación de una actividad enzimática). La foto B presenta la electroforesis de las proteínas de reserva de granos de trigo: cada pista de migración corresponde a una variedad de trigo y cada banda a una proteína dada. La electroforesis sobre gel en dos dimensiones ofrece la ventaja de poder analizar simultáneamente muchas más proteínas (C): una primera migración separa las proteínas según su carga eléctrica, luego una segunda migración perpendicular a la primera las reparte según su tamaño. Vemos en C la dispersión de proteínas salidas de células humanas (fibroblastos) y tras tratamiento por el interferón. Si el análisis se realiza en la molécula de ADN, ésta es extraída de las células, cortada luego en millares de fragmentos por unos enzimas de restricción. Los fragmentos son separados por electroforesis unidimensional. La utilización de «sondas» radiactivas, que tienen la capacidad de hibridarse con fragmentos de ADN homólogos, permite descubrir ciertos fragmentos entre millares de otros (D). Este método ha sido utilizado en Gran Bretaña para establecer una filiación entre el hijo y la madre cuyas bandas de ADN (U: desconocido, M: madre, X: hijo, B: hermano, S_1 y S_2: hermanas) presentan grandes similitudes. (Fotos B: INRA-GEVES; C: N.L. Anderson; D: A.J. Jeffreys, **Nature**, *© Macmillan Journals limited.)*

tantes, no es concebible que unos «juegos» listos para uso sean un día vendidos: las muestras deberán ser analizadas en un laboratorio especializado. En el futuro, las autoridades policiales o judiciales de un país podrían generalizar el empleo de la «huella genética» en todos los casos en que se planteara un problema de identificación. En Gran Bretaña, un tribunal de justicia ha recurrido ya a ella para responder a una demanda de indagación de paternidad.[9] En Estados Unidos, el ejército americano desea establecer la huella genética de todo su personal a fin de poder identificarles, llegado el caso, entre las víctimas de una catástrofe aérea de un bombardeo.[8]

Además del establecimiento de los carnés de identidad de los seres vivos, los mismos métodos pueden servir para determinar unos caracteres particulares. En este punto, las investigaciones están menos adelantadas en los sectores animal y vegetal que en el campo médico. No obstante, las pruebas de detección de caracteres, tal como la resistencia de variedades de tomates a los gusanos nematodos parásitos, ya son practicadas rutinariamente por algunas empresas norteamericanas.[10] Por otra parte, el reciente anuncio de la obtención por unos investigadores del INRA, del INSERM, del Instituto Pasteur, del CEA y del CNRS, de una sonda para bovinos que reconoce el cromosoma Y, específico del macho, y que puede servir pues para determinar el sexo de los embriones, es un ejemplo de lo que es posible conseguir en cría de ganado. En agroalimentaria ya se comercializa una sonda en Estados Unidos, por la firma Integrated Genetics, para detectar la presencia de salmonelas en los alimentos.[11]

Actualmente, estos instrumentos son los más utilizados, sobre todo, en biología clínica. Las aplicaciones de la electroforesis en dos dimensiones son muy prometedoras para el seguimiento precoz de ciertas patologías. Por ejemplo, el desarrollo de un cáncer o de una leucemia se traduce por la aparición de nuevas proteínas, que pueden ser reveladas por estos métodos. La eficacia de sustancias químicas como los medicamentos parece que también se puede detectar de esta manera[2] (véase figura).

Paralelamente se están elaborando unas sondas ADN que permitan la detección precoz de las infecciones parasitarias, víricas o bacterianas.[3] Y han dado origen también a los importantísimos progresos registrados estos últimos meses en el reconocimiento de los genes responsables de graves enfermedades genéticas. Con el tiempo, estas investigaciones deberían de permitir la elaboración de unas «pruebas» de diagnóstico fiables para un creciente número de enfermedades hereditarias, como la mucoviscidosis y las miopatías (véase «Le diagnostic prénatal» en nuestro número de mayo 1985). A menos que algunas técnicas como la electroforesis bidimensional puedan servir para detectar las proteínas responsables del síndrome, aportando soluciones más rápidas que la utilización de sondas.

Prever las consecuencias éticas y legales

Todas esas innovaciones plantean o plantearán unos problemas éticos y jurídicos nuevos. Una de las consecuencias será sin duda el replanteamiento del estatuto particular de la creación de variedades vegetales. Actualmente, cualquier variedad obtenida por una sociedad se inscribe en un catálogo oficial, identificada según sus características morfológicas. Sin embargo, los textos internacionales consideran artificialmente del todo cada variedad como totalmente independiente de las variedades que la han precedido. No hay ningún estatuto jurídico de «proximidad» genética y, por consiguiente, no puede registrarse ninguna patente que demuestra un «perfeccionamiento» del material. Además, por el momento, una empresa semillera no puede oponerse eficazmente a que una firma competidora se sirva de su material para crear otra variedad, ni reclamar réditos. Ahora bien, las técnicas de electroforesis introducen unas posibilidades de caracterización y de establecimiento de parentesco entre variedades comparables a una patente industrial y, en consecuencia, de creciente protección. Las empresas podrían a partir de ahí reclamar derechos de autor sobre su producción. La sociedad Molecular Genetics ya registró en 1984 la primera patente americana para una variedad de maíz salida de la ingeniería genética.[12] Otra ilustración de este fenómeno viene dada por el proceso entablado en octubre de 1984 por una poderosa empresa maicera (Pioneer) contra una competidora (Holden) que habría utilizado sin autorización una de sus castas par la creación de una variedad híbrida. El fallo todavía no ha sido pronunciado, pero parece que la acusación se basa en parte en características electroforéticas.

En el hombre, los riesgos de error son muchos, como indica clarísimamente el informe de la Comisión americana para el estudio de los problemas éticos en Medicina.[13] Verdad es que un número creciente de enfermedades letales o debilitantes podrán ser rastreadas en el transcurso de la vida fetal, permitiendo a «parejas con alto riesgo» no traer al mundo más que a niños sanos para el riesgo considerado. También es necesario que el acceso a estas pruebas sea libre, si se desea, y que propuesto el aborto, si ha lugar, sea dejado a la libre elección de los padres, sin presión alguna que pudiera asimilarse a una forma de eugenesia.

La divulgación a un portador sano de la presencia de un gen supuestamente anormal en su patrimonio hereditario es otro problema que merece una atención especial. En efecto, es fácilmente imaginable el efecto psicológico en un individuo al descubrir que es portador de un gen patógeno, responsable por ejemplo de la enfermedad de Alhzeimer, debilitante y mortal a partir de los 40 años, y para la cual no existe ningún tratamiento eficaz. Las consecuencias para su vida profesional podrían resultar igualmente desastrosas si los resultados de las pruebas diagnósticas fueran comunicados a terceros, como las compañías de seguros o los patrones. ¿El reciente descubrimiento de marcadores genéticos útiles para prever un riesgo potencial de enfermedades cardiovasculares[14] debería hacer obligatorio la prueba pertinente en los *curriculi vitae* de los futuros directores generales?

En realidad, el rastreo genético en la contrata ya se practica.[15] Uno de los casos más conocidos es el de la prueba de la anemia falciforme, una enfermedad que afecta esencialmente a los negros americanos. Se basa en la detección de los portadores «sanos» (que

(9) A.J. Jeffreys *in DNA probes, op. cit.*, p. 57.
(10) S.D. Tanskley, T.J. Orton (eds.), *Isozymes in plant genetics and breeding*, Elsevier, 1983, p. 147.
(11) M.S. Curiale *et al.*, *in DNA probes, op. cit.*, p. 143.
(12) M. Sun, *Science, 230*, 303, 1985.
(13) *Screening and counseling for genetic conditions*, A report on the ethical, social and legal implications of genetic screening, Counseling and Education Programs, 1983.
(14) E. Boerwinkle, *The use of measured genotype information in the genetic analysis of quantitative phenotype*, University of Michigan, 1985.
(15) G. Kolato, *Science, 232*, 317, 1986.

tengan un ejemplar del gen patógeno) que se considera incapaces en ciertas condiciones de trabajo. Esta argumentación, aún discutida, ha sido utilizada por algunas empresas americanas para realizar una verdadera selección en el empleo. Otras características genéticas, cuya frecuencia varía según las comunidades étnicas, parece que deberían acarrear unas sensibilidades acrecentadas a diversos productos industriales, aunque con frecuencia sea muy difícil probar una interacción entre un estado genético y un entorno mal definido. Al recurrir los patrones a métodos de «selección en la contrata» ¿debemos ver en ello una forma enmascarada de eliminar a trabajadores indeseables en esos tiempos de crisis económica y de creciente xenofobia?

Por último, en el horizonte se perfila un riesgo que tener en cuenta; el de ver constituirse unos ficheros informatizados que registren las características genéticas de los individuos. La codificación anónima de las muestras por los laboratorios públicos o privados debe ser examinada desde ahora a fin de proteger las libertades individuales. Deseamos que la «huella genética», más fiable y más precisa que la huella digital, no pueda servir para la elaboración de carnés de identidades infalsificables de un nuevo género.

Así, más allá del evidente interés de las aplicaciones actuales o potenciales de estos métodos, los problemas éticos, jurídicos y económicos distan aún de haber sido en su totalidad planteados y resueltos. Si no podemos sino felicitarnos de las nuevas posibilidades de seguimiento prenatal de graves enfermedades hereditarias o de la detección precoz de enfermedades curables, las consecuencias sociales que pueden acarrear no son desdeñables. ¿Será la eliminación la única respuesta dada por nuestras sociedades técnicas frente al «anormal»? Pero ¿dónde se sitúa el límite entre el normal y el anormal, los genes «buenos» y «malos»? ¿Dónde pararse en la tría de los genes? ¿Será preciso contar con la inercia social o la sabiduría colectiva para evitar soluciones eugénicas y una utilización desordenada de esos instrumentos (véase «La tentación de la eugenesia» en nuestro número de julio/agosto 1984)? ¿Podemos contar con los comités éticos o la Comisión Nacional de Informática y Libertades (CNIL) para evitar los errores de todo género?

Igual que para los nuevos instrumentos del control de la reproducción debe considerarse la necesidad de una información completa y profunda lo más rápidamente posible a fin de proteger el libre albedrío de cada uno frente a los poderes científicos y estatales. ¡Hagamos de manera que ello no quede en simple voto piadoso!

Dominique Brunel.





MICROSCOPIOS KYOWA

Trioculares, binoculares, monoculares. Biológicos. Metalúrgicos. De Polarización. Estereoscópicos. Amplia gama de accesorios: Iluminadores de fibra óptica, halógenos o luz Köehler, equipos contraste de fases, visores, cámaras Polaroid y reflex...





V/O MASHPRIBORINTORG

Microscopios y Aparatos Científicos



Microscopio
de Fluorescencia

Dos Microscopios excepcionales para Escuelas y Colegios
CALIDAD-PRECIO-ROBUSTEZ



Microscopio de Estudiante
Mod. BIOLAM S-11
1350x



Microscopio Escolar
Mod. UM-301
300x



telescopios MIZAR

REFRACTORES, REFLECTORES, CATADIOPTRICOS









M13 en Hércules
(foto C-8)

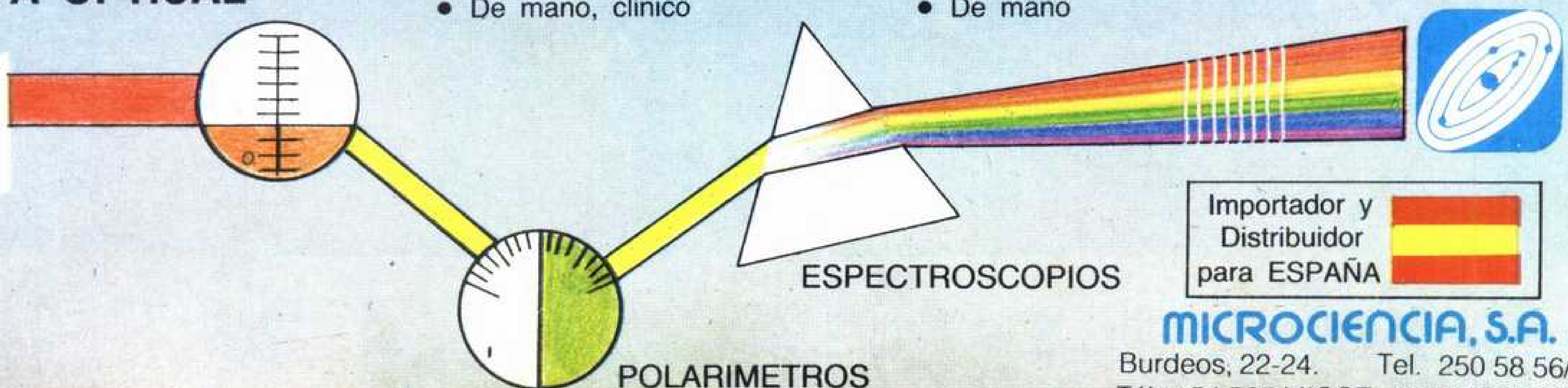
SCHMIDT-CASSEGRAIN, MAKSUTOV, NEWTON, REFRACTORES, Cámaras SCHMIDT y WILLIANS (CO_2)

SHIBUYA OPTICAL

☆ REFRACTOMETROS
- De ABBE
- Gemológicos
- De mano para azúcar
- De mano, clínico

☆ MICROTOMOS
- Deslizamiento
- Rotación
- Congelación
- De mano





Importador y Distribuidor para ESPAÑA

MICROCIENCIA, S.A.
Burdeos, 22-24. Tel. 250 58 56/55
Télex 54 785 MICCE - 08029 Barcelona



El origen de la Luna

por Alan P. Boss y Willy Benz



Los poetas no son los únicos que sueñan mirando a la Luna; también los astrónomos la contemplan, desde hace más de un siglo, intentando descubrir el misterio de sus orígenes. Sus «ensoñaciones científicas» les han llevado a proponer múltiples hipótesis sobre la naturaleza de la relación de parentesco existente entre la Tierra y la Luna. ¿Es la Luna una hija de la Tierra arrancada de sus entrañas? ¿Son ambas hermanas gemelas nacidas al mismo tiempo? ¿O, quizá sea la Luna una extraña aventurera capturada por la Tierra y condenada a girar indefinidamente a su alrededor? Con las misiones Apollo, al principio de los años setenta, se esperaba que el debate tuviese rápidamente final. En realidad, pese a la cosecha de resultados obtenidos, sólo ahora, tras largos trabajos teóricos, se han realizado progresos decisivos. Alan P. Boss y Willy Benz nos proponen así una nueva imagen en la que la Tierra choca, en gigantesca colisión, con un planeta del tamaño de Marte. De esta unión catastrófica habría nacido la Luna, un cuerpo híbrido que conservaría en su interior el recuerdo de sus fogosos padres.

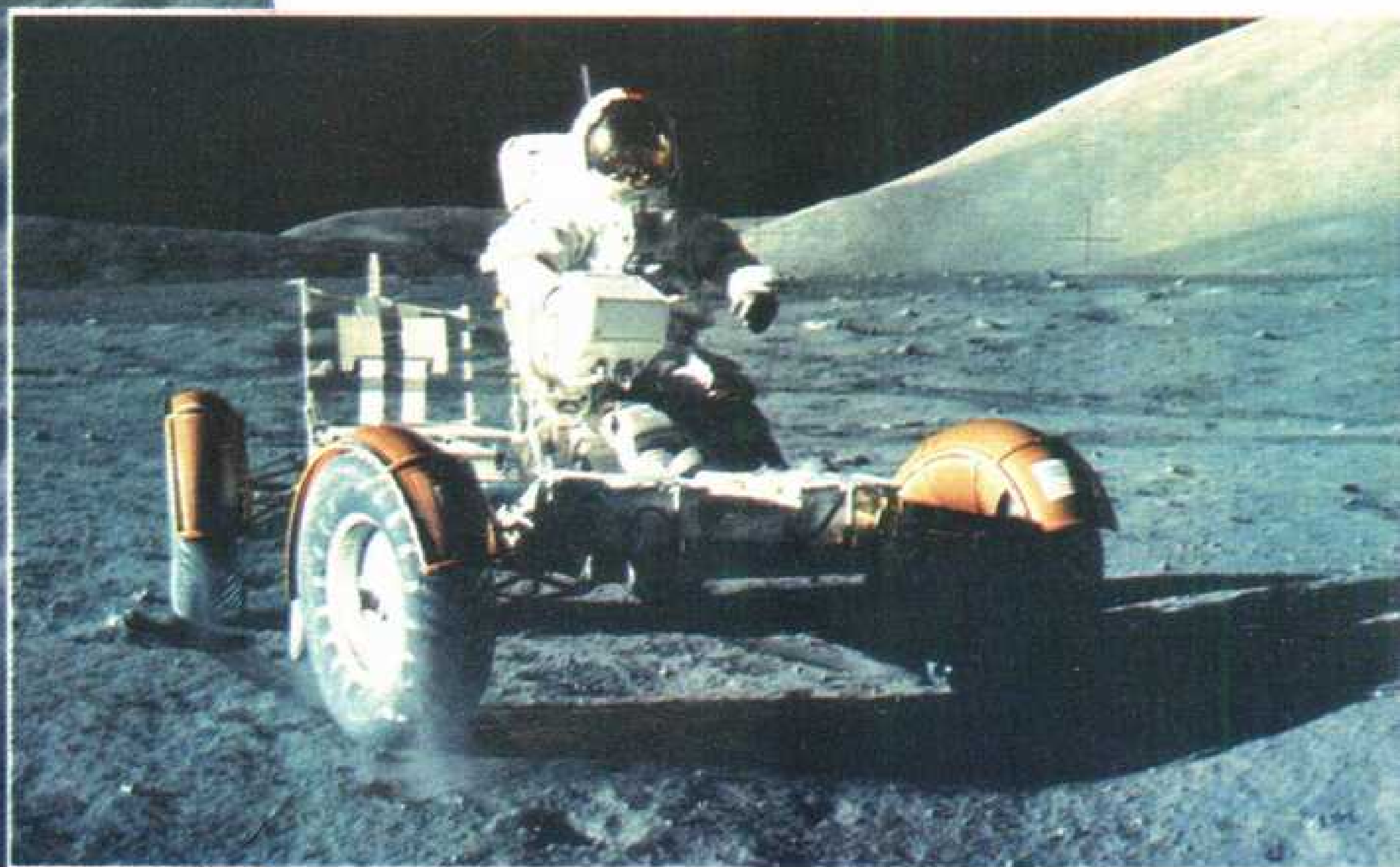


Figura 1. Al final de la década de los sesenta el mundo contemplaba estas sorprendentes fotografías tomadas desde la Luna; con ellas llegaron a la Tierra las primeras muestras de rocas lunares. En total se recogieron 382 kilogramos de muestras de rocas lunares durante las misiones Apolo entre 1968 y 1972. El análisis de la composición isotópica de las muestras lunares iba a revelar que la Luna se formó aproximadamente en la misma época que la Tierra, es decir, hace unos 4.500 millones de años. (Fotos NASA.)

Primera prioridad: ser coherente con la teoría de la formación de los planetas.

Hace más de dieciséis años que las primeras muestras de rocas lunares eran traídas a la Tierra por las misiones Apollo (fig. 1). Para el conjunto de la comunidad científica el principal objetivo de estas misiones iba a alcanzarse finalmente: proporcionar indicios concluyentes no sólo sobre la formación de la Luna, sino también sobre la de los planetas del sistema solar, problemas que desde hacía muchos años no dejaban de dividir a los investigadores y eran objeto de numerosas hipótesis y modelos.

Ésta era al menos una de las grandes esperanzas de uno de los pioneros de la conquista planetaria, Harold C. Urey, al que se debía en buena parte el programa Apollo. Y aunque sus esperanzas se vieron en gran parte frustradas durante varios años, la cosecha de informaciones recogida por Apollo y la aportación de recientes trabajos teóricos permiten ahora esbozar un modelo coherente sobre la formación de la Luna y los planetas llamados telúricos: Mercurio, Venus, la Tierra y Marte.

En efecto, las misiones Apollo han permitido circunscribir los principales parámetros físicos y químicos que caracterizaron a la Luna en sus orígenes. El análisis de la composición isotópica de las muestras lunares ha revelado que la Luna se formó aproximadamente en la misma época que la Tierra, es decir hace unos 4500 millones de años.[1] Pero como los márgenes de error en las medidas de datación son todavía demasiado amplias, no se puede precisar si es más vieja la Tierra o la Luna. En cambio, se sabe que el intervalo de tiempo entre los momentos de sus formaciones respectivas no supera los cien millones de años.

La estimación de la composición química global de la Luna ha puesto de relieve la sorprendente semejanza que existe entre nuestro satélite y el manto terrestre en lo que respecta a la densidad media y a la baja concentración de algunos elementos químicos como el hierro o el níquel. De otra parte, los estudios sísmicos realizados a partir de temblores de Luna registrados por medio de sismógrafos colocados en la Luna por los astronautas de Apollo han demostrado que la Luna es sólida hasta 1.000 kilómetros de profundidad (es decir el 90 % de su volumen). Los datos actuales no permiten afirmar la existencia de un núcleo lunar constituido por rocas parcialmente fundidas que, de todos modos, sería muy pequeño. Esta homogeneidad aparente de la Luna es el origen de la hipótesis de una formación de la Luna a partir del manto terrestre, una vez terminada la formación del núcleo de la Tierra por decantación del hierro y del níquel. Pero la concentración de otros elementos complica este esquema demasiado sencillo. Así, elementos como el flúor, el cloro y el plomo, al igual que moléculas volátiles como el agua, son menos abundantes en las muestras lunares que en el manto terrestre. La ausencia de estas sustancias en la Luna deja en falso esta hipótesis de la formación de la Luna a partir del manto terrestre.

Durante mucho tiempo se ha considerado aisladamente el problema de la formación de la Luna debido probablemente a que, de todos los planetas, es la

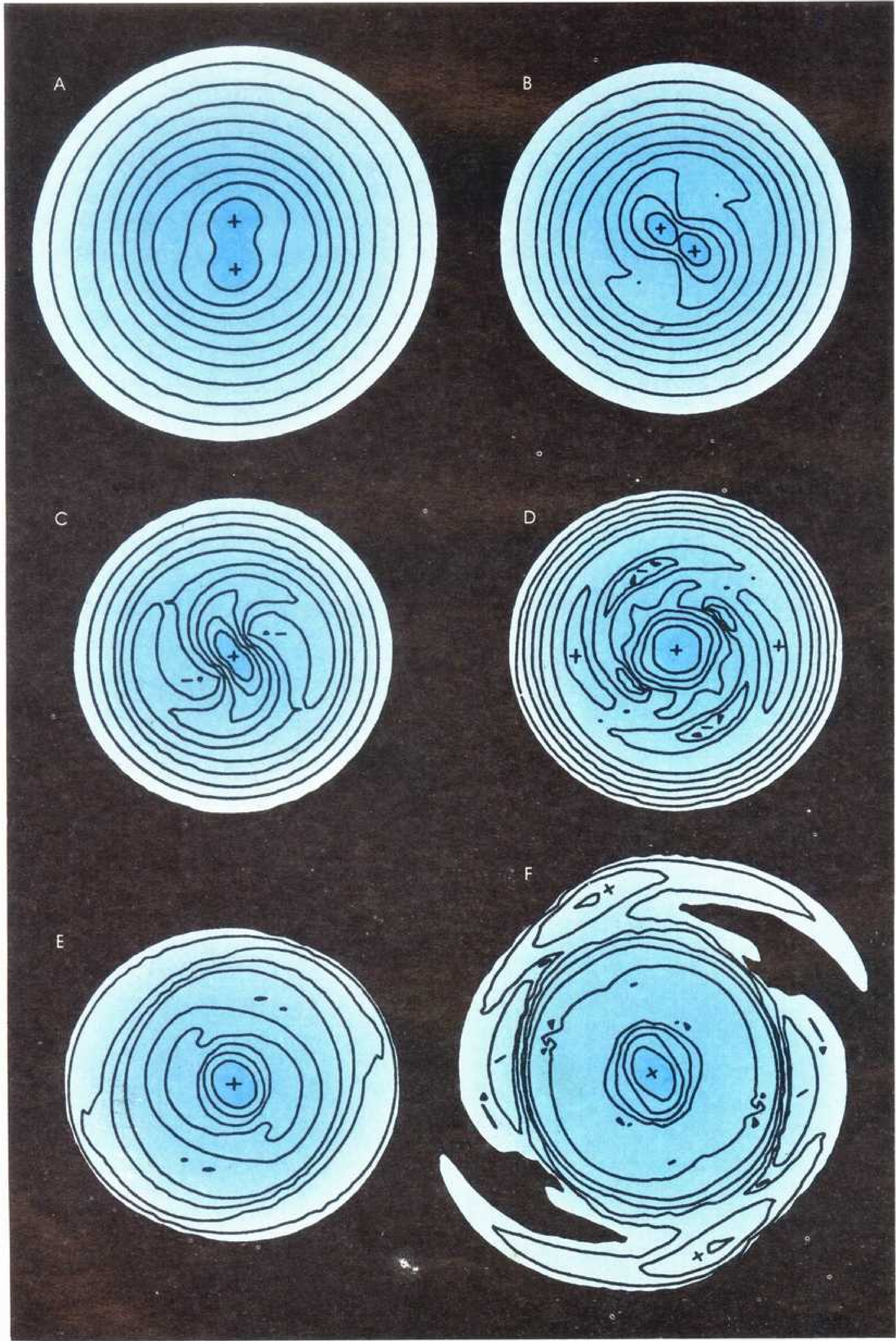
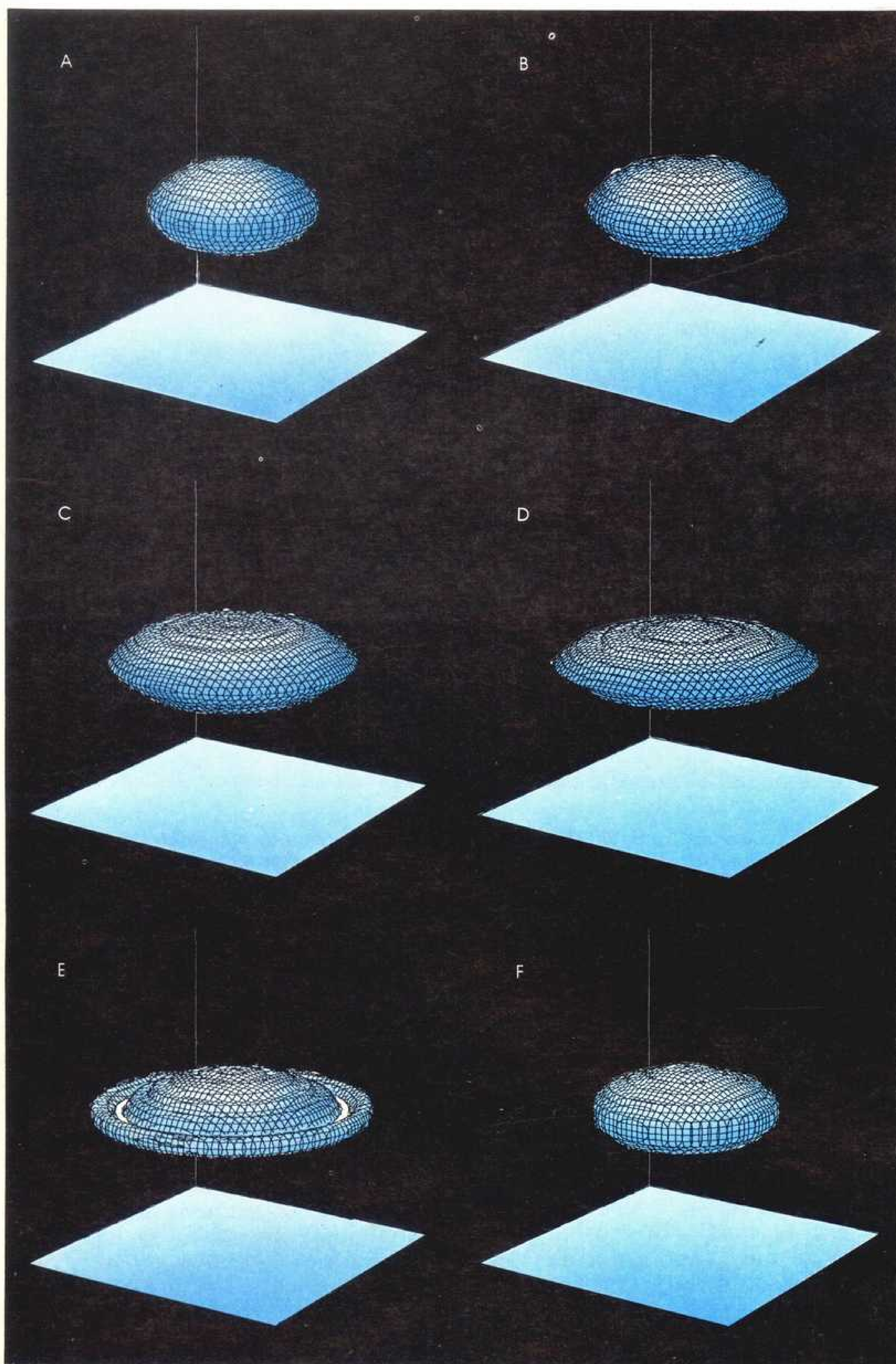


Figura 2. La hipótesis más antigua sobre el origen de la Luna es la de la fisión en virtud de la cual la Luna se habría separado de la Tierra, en una época en la que ésta giraba demasiado deprisa para mantenerse estable. Actualmente esta teoría puede estudiarse mediante simulaciones en el ordenador. Esto es lo que nos muestra esta figura, en la que se ha representado la evolución en el tiempo de un modelo de Tierra fluida en rotación rápida. Se observa al principio que el cuerpo original empieza a escindirse en dos (fases A y B), pero luego se ve el crecimiento de brazos espirales en las capas externas (fases C y D), que al acaparar buena parte del momento cinético, fuerzan al sistema binario central a unirse de nuevo (fase E). Luego los brazos espirales se alejan para formar un anillo de materia alrededor del cuerpo inicial (fase F). La Luna habría podido formarse ulteriormente a partir de este anillo, pero este modelo no puede tomarse en consideración ya que los cálculos se basan en una Tierra fluida. Y, en el momento de su formación, la Tierra era probablemente un cuerpo parcialmente fundido con una viscosidad intermedia (del orden de 10^{15} poises). Si se introduce este dato en el modelo numérico se observa entonces que la tendencia a la fisión desaparece por completo. (Según Durisen et al.*[4])*

Alan P. Boss es investigador en la sección de magnetismo terrestre en la Carnegie Institution de Washington. Sus investigaciones se centran en las teorías de formación estelar y planetaria y en la dinámica planetaria interna. **Willy Benz** trabaja asociado al grupo de Astrofísica Teórica de Los Alamos National Laboratory, en Los Alamos, Nuevo México. Estudia especialmente la formación de estrellas en los discos de acreción y la evolución de los sistemas estelares densos.

única que desempeña el papel de satélite. Actualmente conviene situarlo en el marco general de la formación de los planetas telúricos. Según la versión más elaborada de la teoría sobre la formación de los planetas,[2] éstos habrían crecido por acreción de cuerpos pequeños llamados planetoides. Estos se habrían formado a partir de hundimientos gravitatorios en pequeña escala en el seno de un delgado disco de polvo, surgido a su vez de la nube interestelar de gas y polvo que se hundió para originar el Sol. El tamaño de los planetoides en esta fase, del orden de cinco kilómetros, habría aumentado debido sobre todo a las colisiones entre ellos, con reducción de su velocidad relativa; entonces las fuerzas de atracción gravitatoria habrían asegurado su cohesión. Durante las fases iniciales, las colisiones debían ser relativamente suaves, ya que tenían lugar entre planetoides que evolucionaban en órbitas vecinas. Pero el tamaño de los planetoides aumentó durante este período para alcanzar unos mil kilómetros. En este momento fueron suficientemente másicos para perturbar fuertemente las órbitas de sus respectivos vecinos, aumentando así la excentricidad de sus órbitas y, debido a ello, la velocidad relativa en el momento de las colisiones. Estas colisiones se hicieron entonces cada vez más catastróficas y pudieron provocar incluso la destrucción completa de los planetoides. La etapa final, con mucho la más larga, duró cien millones de años, durante los cuales, la competencia gravitatoria entre los diferentes embriones de planetas determinó la formación de los planetas telúricos, tal como los conocemos actualmente. Y la duración de esta última etapa es del mismo orden que el margen de incertidumbre en las medidas de la edad de la Tierra y de la Luna. Esta coincidencia es compatible con nuestra hipótesis de que la formación de la Luna es el resultado de los mismos procesos físicos que engendraron los planetas telúricos. Por tanto, es conveniente revisar las diferentes hipótesis existentes sobre el origen de la Luna y ver en qué medida son compatibles con la teoría de la formación de los planetas telúricos.



La Luna surgida de la Tierra

Una de las hipótesis más antiguas sobre la formación de la Luna es probablemente la de la fisión, en virtud de la cual la Luna se separó de la Tierra. En efecto, al final del siglo XIX el astrónomo G.H. Darwin, el hijo del célebre naturalista, descubrió que la Luna había estado antes mucho más cerca de la Tierra. Este alejamiento constante de la Luna, del orden de tres metros por siglo, se debe de hecho al frenado de la rotación terrestre por efecto de las mareas. En efecto, la atracción lunar deforma al globo terrestre en un elipsoide, pero estas deformaciones no son completamente elásticas y se disipa en forma de calor, energía tomada de la energía de rotación de la Tierra. Digamos brevemente que esta disipación de calor provoca un retraso en la deformación de la Tierra y de los océanos. La atracción lunar, al actuar sobre los abultamientos debidos a las mareas, induce una fuerza retardadora que tiende a frenar la rotación de la Tierra. El momento cinético perdido en el frenado de la rotación terrestre se recupera en el interior del sistema aislado Tierra-Luna en forma de momento cinético de rotación de la Luna alrededor de la Tierra, lo que se traduce en un aumento de la distancia Tierra-Luna (véase «Las variaciones de la rotación de la Tierra» en nuestro número de diciembre de 1986). Para G.H. Darwin, este alejamiento progresivo de la Luna aboga en favor de un origen terrestre de la Luna: ésta se

Figura 3. Si se tiene en cuenta la viscosidad de la Tierra, se puede simular en ordenador la evolución en el tiempo de un modelo de Tierra viscosa en rotación rápida. Se nota, como nos muestra esta figura, que, en vez de escindirse en dos cuerpos, la Tierra se habría desprendido de un anillo de materia en el ecuador. Este anillo habría podido originar la Luna, como en la hipótesis ilustrada en la figura 2. Pero esta hipótesis no puede tenerse en cuenta ya que supone un momento cinético netamente superior al del sistema Tierra-Luna actual. (Según A. P. Boss, 1986[6] Icarus, Academic Press.)

(1) F. Tera, G. J. Wasserburg, *Proc. Fifth Lunar Conf. 2*, 1571, 1974.
(2) G. W. Wetherill, *Ann. Rev. Astron. Astrophys. 18*, 77, 1980.

habría formado a partir del manto terrestre, después de que se hubiese individualizado el núcleo metálico en el centro de la Tierra.

En su época, los estudios sobre las configuraciones en el equilibrio de cuerpos fluidos en rotación le proporcionaron un mecanismo posible que permitía explicar esta separación: la fisión. En efecto, resultaba que un cuerpo fluido incomprensible, tal como se puede considerar a la Tierra, no puede permanecer en equilibrio estable si su momento cinético es demasiado grande, es decir, se gira demasiado deprisa. El cuerpo reacciona buscando un nuevo estado de equilibrio, lo que se traduce en su fisión en dos. G.H. Darwin aplicó este principio a la Tierra, cuya rotación habría sido en el pasado demasiado rápida, y de la que se habría separado la Luna; el océano Pacífico representaría la cicatriz de la ruptura. ¿Cuál es la situación actual de la hipótesis? En 1980, Joel Tohline (Louisiana State University), Robert Gingold (Mt Stromlo and Siding Springs Observatory) y uno de nosotros (Alan P. Boss) utilizamos tres modelos numéricos diferentes para estudiar la evolución dinámica y en tres dimensiones de cuerpos fluidos en rotación rápida (fig. 2). Los tres modelos llegan a conclusiones idénticas: el resultado no es, a fin de cuentas, dos cuerpos distintos.[3] Al principio, es cierto, el cuerpo original podrá empezar a escindirse en dos, pero el crecimiento de brazos espirales en las capas externas de pequeña densidad acaparará una buena parte del momento cinético, forzando así al sistema binario naciente a volver a soldarse. Entonces los brazos espirales se alejarán, animados por su elevado momento cinético, para formar un anillo de materia alrededor del cuerpo inicial. Teóricamente la evolución ulterior de este anillo habría podido permitir que una parte de él se aglomerase y formase la Luna a partir de la Tierra.

Durante este proceso, una parte importante de los elementos volátiles se habría perdido, lo que permitiría explicar la composición química de la Luna.[4] No obstante, incluso este modelo mejorado no es satisfactorio ya que los cálculos se basan en la hipótesis de que la Tierra se comporta como fluido de viscosidad muy pequeña. Si la Tierra hubiese estado inicialmente en estado de fusión, esta suposición sería válida, ya que el magma terrestre, constituido por rocas fundidas se comporta como un fluido de una viscosidad comprendida entre 10^2 y 10^6 poises. Sin embargo, la homogeneidad química del manto, al igual que los cálculos sobre la historia térmica de la Tierra indican que ésta no ha sido nunca completamente líquida. En nuestros días, el manto terrestre evoluciona en el tiempo como un líquido con una viscosidad efectiva mucho más elevada del orden de 10^{22} poises. En el momento de su formación, la Tierra era probablemente un cuerpo parcialmente fundido, con propiedades viscosoelásticas que se situaban en algún lugar entre los dos extremos que son el magma y el manto actual: las estimaciones sitúan la viscosidad de la Tierra en aquella época en torno de 10^{15} poises. Si se utiliza este dato en los modelos sobre la inestabilidad de rotación, se descubre que la tendencia a la fisión desaparece.[5] Un cuerpo muy viscoso no se deja fragmentar como lo haría un cuerpo menos viscoso.

La verosimilitud de la hipótesis de la fisión simple se reduce todavía más si se considera el efecto combinado de la llamada disipación viscosa y la compresibilidad. En efecto, durante los cien millones de años que duró la formación de la Tierra, ésta se comportó práctica-

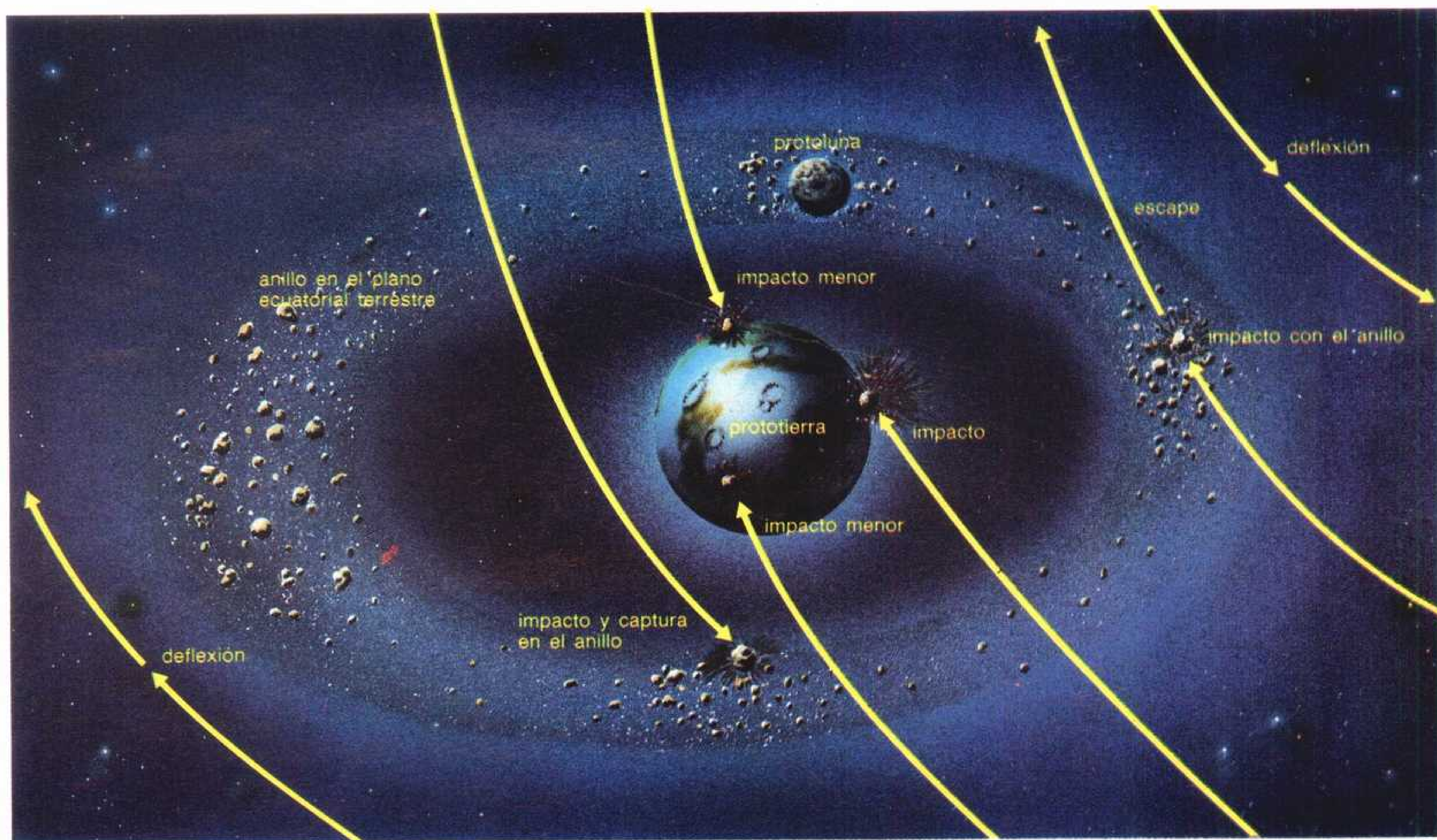
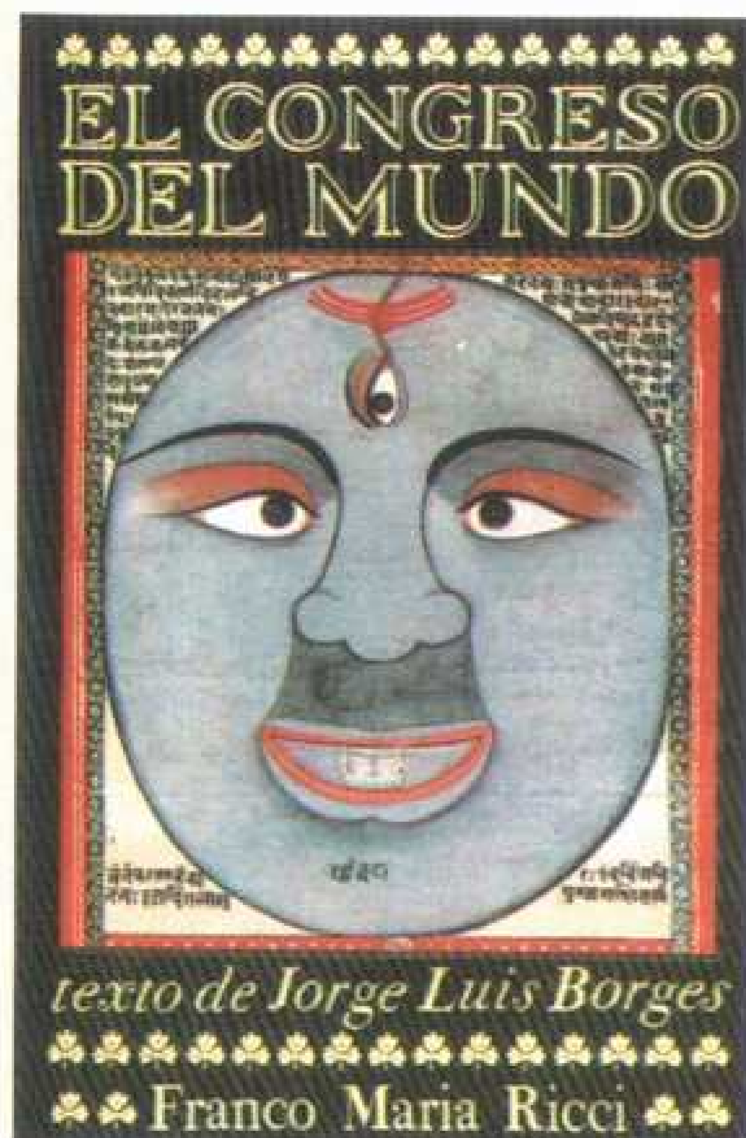
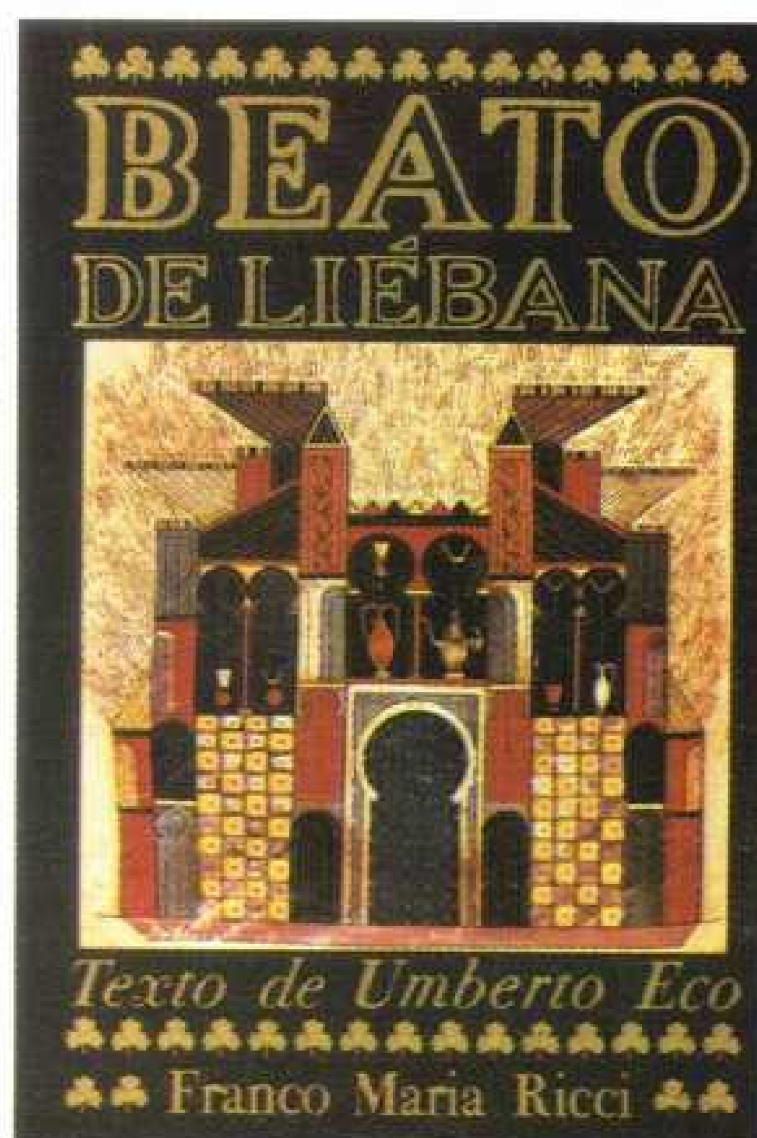


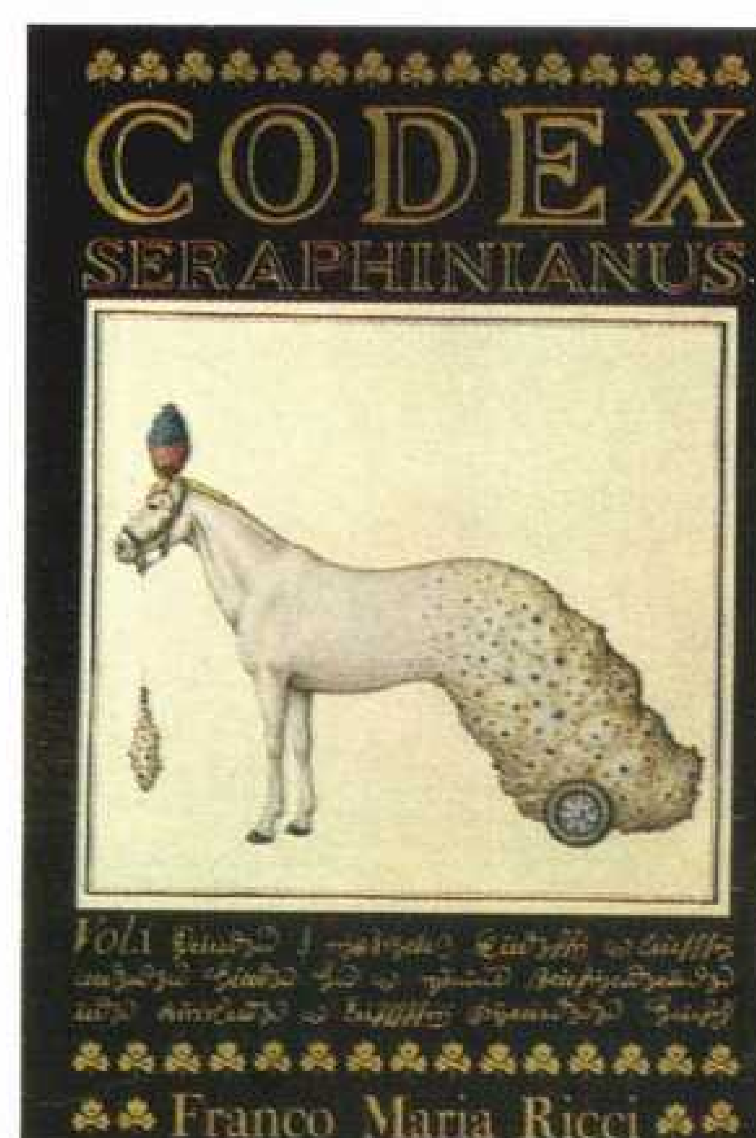
Figura 4. En la hipótesis llamada de la acreción binaria, un primer esbozo de la Tierra, o prototierra, está cerca de planetoides que colisionan entre sí. Estos planetoides son capturados poco a poco por la prototierra y permanecen en órbita a su alrededor engendrando un enjambre. Si el número de planetoides es suficiente, chocarán con otros planetoides y se alimentará continuamente la cantidad de materia del enjambre. Si el enjambre de planetoides adquiere suficiente momento cinético, adoptará la forma de un delgado anillo en el plano ecuatorial de la prototierra, tal como muestra esta figura. Al igual que en las hipótesis precedentes, la Luna se habría formado progresivamente a partir de este anillo de materia, como ilustra el embrión de Luna, o protoluna, representado en la figura. Esta hipótesis da adecuada razón de la composición química de la Luna, pero se tiene que eliminar ya que el momento cinético total del sistema no sería suficiente para impedir que el enjambre en rotación alrededor de Tierra cayese sobre ella. (Según A.P. Boss y S.J. Peale[22])

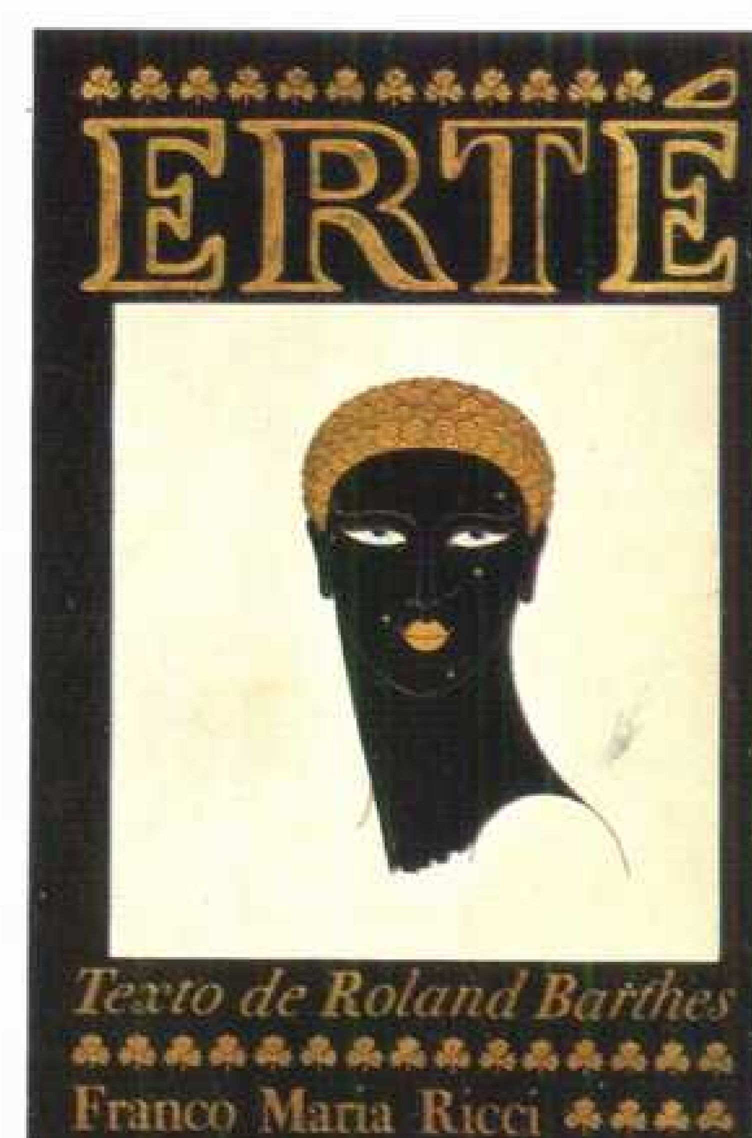
(3) R. H. Durisen *et al. Astrophys. J. 305*, 281, 1986.
(4) R. H. Durisen, E. H. Scott, *Icarus, 58*, 153, 1984.
(5) A. P. Boss, H. Mizuno, *Icarus, 63*, 134, 1985.

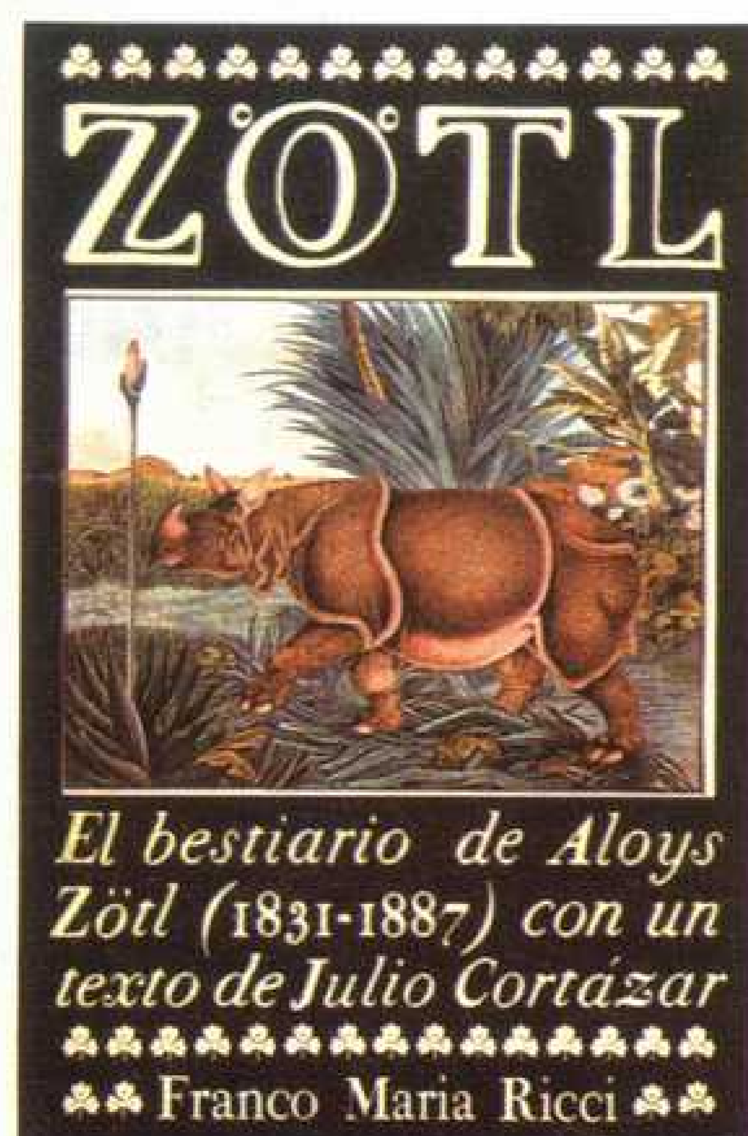
LOS SIGNOS DEL HOMBRE

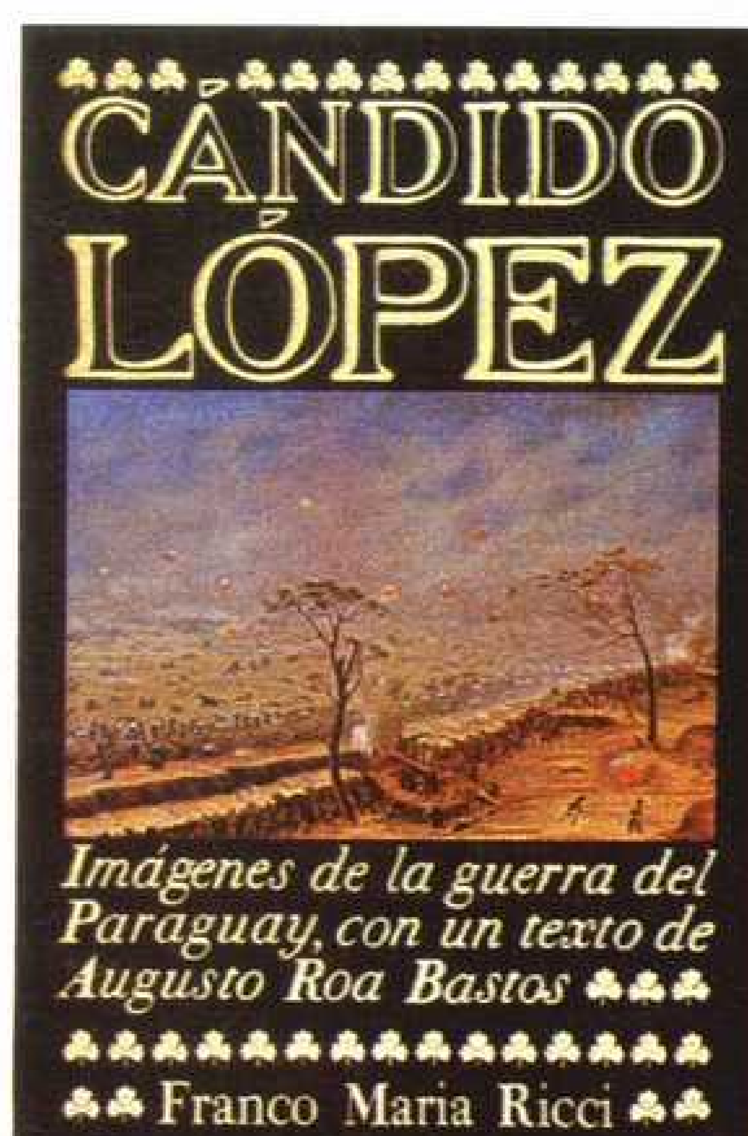


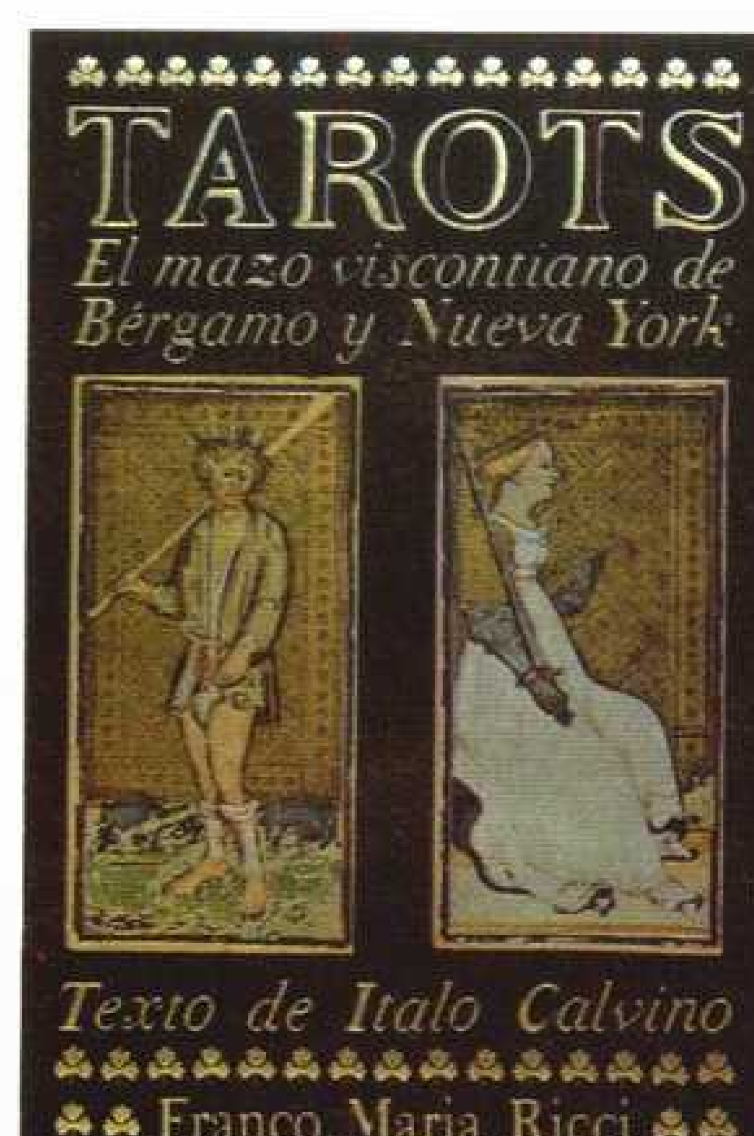




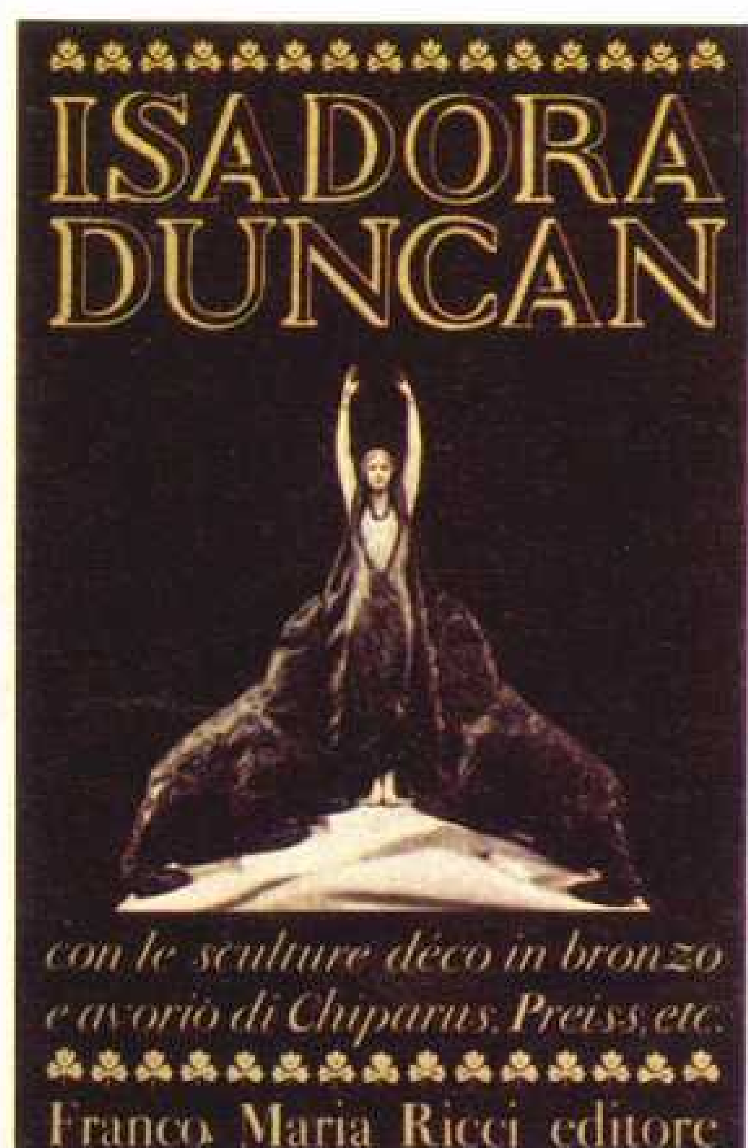






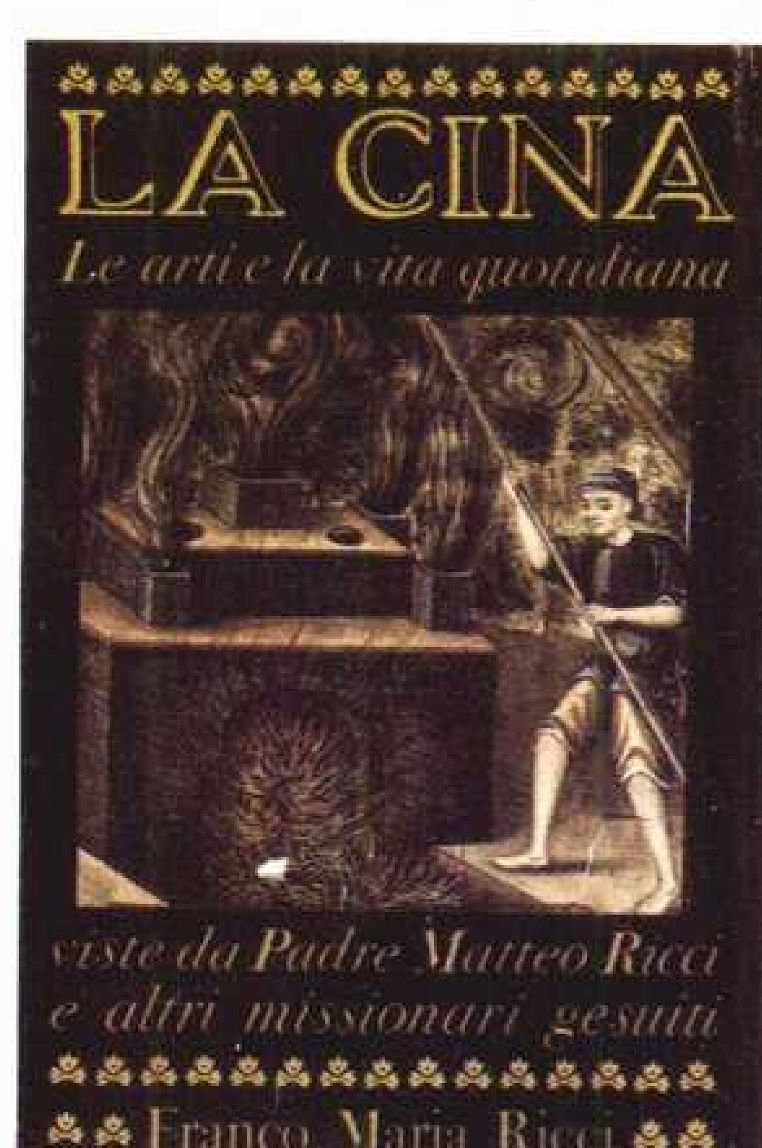


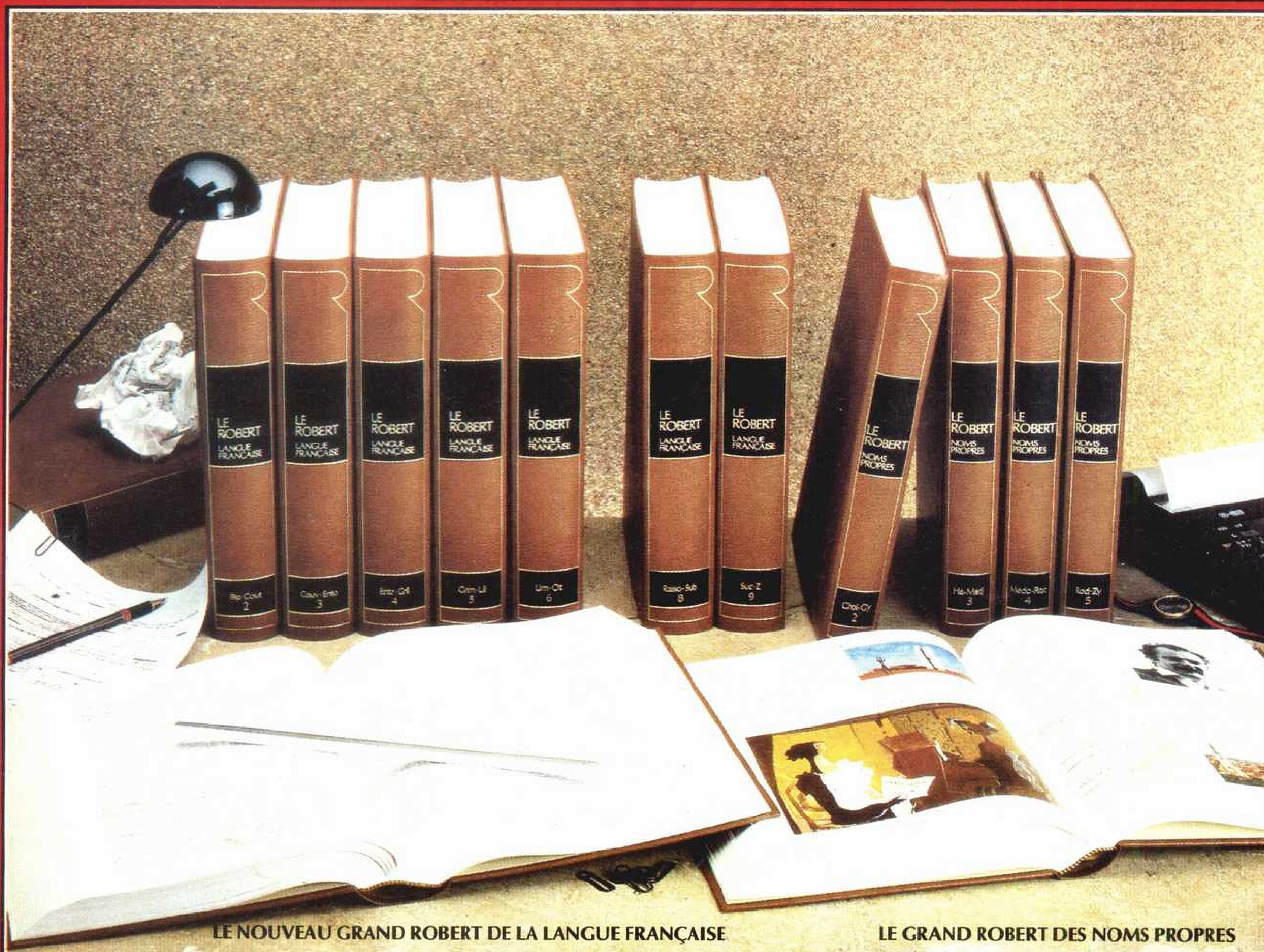












LE NOUVEAU GRAND ROBERT DE LA LANGUE FRANÇAISE — LE GRAND ROBERT DES NOMS PROPRES

Le nouveau GRAND ROBERT:

20 000 mots et 50 000 citations supplémentaires, 9 volumes au lieu de 7.

Le dictionnaire dont le Général de Gaulle a dit. «...cette œuvre va rendre les plus grands services à tous ceux qui usent de la langue française avec le souci de la respecter et le désir qu'elle les inspire...», LE GRAND ROBERT change dans la continuité.

Dans le respect de son créateur Paul ROBERT, une importante équipe sous la direction d'Alain REY a entièrement remis à jour et considérablement enrichi le GRAND ROBERT.

Ce dictionnaire de langue française est unique en son genre car il appartient à la série des « ROBERT », les seuls dictionnaires à la fois alphabétiques et analogiques proposant un système de renvois qui font découvrir tout l'environnement d'un mot ou d'une idée.

Le nouveau GRAND ROBERT présente aujourd'hui une nomenclature de 80 000 mots (dont 20 000 supplémentaires) et 250 000 citations (au lieu de 200 000). C'est le plus grand recueil de citations littéraires, scientifiques, techniques et journalistiques, empruntées aussi bien aux écrivains classiques qu'aux auteurs contemporains.

Il contient les derniers-nés des mots français, qu'ils soient savants ou familiers, techniques ou courants.

Pour accueillir ces nouvelles richesses, le GRAND ROBERT se présente en 9 volumes dont la consultation entraîne le lecteur dans un fantastique voyage au pays des mots.

A ces 9 volumes s'ajoutent les 5 volumes du GRAND ROBERT des noms propres, indispensable complément du GRAND ROBERT de la langue française, comportant 42 000 articles, 4 500 illustrations couleurs et noir, 210 cartes.



ENCOUNTER ENGLISH * MÉTODO DE E. BRITANNICA * 4 NIVELES.

NIVEL 1... SPEAK ENGLISH

Para personas con escaso o nulo conocimiento de inglés.

① 4 volúmenes con 492 páginas ilustradas, 29 ejercicios y 806 micro-discos.
② 1 microfonógrafo y su auricular.
③ 1 adaptador de tarjetas sonoras, *Lexicards*.
④ 1 guía del estudiante, 270 páginas.
⑤ 2 series de tarjetas sonoras: 48 *Lexicards*.
⑥ 1 juego completo de 24 fichas de colores.

NIVEL 2... IMPROVE YOUR ENGLISH

Para personas con un conocimiento limitado con el que pueden expresarse con frases sencillas.

⑦ 4 volúmenes con 448 páginas ilustradas, 24 ejercicios y 793 micro-discos.
⑧ 1 guía de estudiante, 220 páginas.
⑨ 2 series de tarjetas sonoras: 48 *Lexicards*.

NIVEL 3... PERFECT YOUR ENGLISH

Para personas con conocimientos de la gramática básica y vocabulario suficiente para expresarse con cierta fluidez.

⑩ 4 volúmenes con 448 páginas ilustradas, 24 ejercicios y 70 micro-discos.
⑪ 1 guía del estudiante, 238 páginas.
⑫ 2 series de tarjetas sonoras, 48 *Lexicards*.

NIVEL 4... ADVANCED ENGLISH

Para personas con un excelente dominio del idioma y que desean entrar en las diferencias entre el inglés británico y el americano.

⑬ 4 volúmenes con 448 páginas ilustradas, 24 ejercicios y 796 micro-discos.
⑭ 1 guía de más de 220 páginas.

Deseo más información de la OFERTA ESPECIAL en España y Portugal de:

☐ ENCICLOPÉDIA MIRADOR INTERNACIONAL. 20 Vols. Texto en portugués
☐ THE GREAT BOOKS OF THE WESTERN WORLD, 54 volúmenes
☐ MAPAMUNDI DEL AÑO 1375 ☐ CODEX GRANATENSIS, 2 Vols.
☐ ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA. 32 Vols. Edición 1986
☐ THE OXFORD ENGLISH DICTIONARY, 16 Vols. ☐ LE GRAND ROBERT, 14 Vols.
☐ ENCYCLOPAEDIA UNIVERSALIS, 22 Vols. Edición 1984-85
☐ THE NEW GROVE DICTIONARY OF MUSIC & MUSICIANS, 20 Vols.
☐ ENCYCLOPEDIE DE DIDEROT ET D'ALEMBERT, 18 Vols. Facsímil
☐ LA GRANDE HISTOIRE DE LA PEINTURE –SKIRA–, 16 Vols.
☐ ATLAS ☐ Britannica Atlas ☐ Gran Atlas de Arqueología. Septiembre 1986.
☐ Atlas de l'Architecture* ☐ The Thimes Atlas of the Oceans* ☐ Atlas of World Mythology
☐ Atlas de l'Astronomie* ☐ EL MUNDO, Gran Atlas de Historia
☐ SIGNOS DEL HOMBRE ☐ Congreso del Mundo ☐ Beato de Liébana
☐ Codex Seraphinianus. 2 Vols. ☐ Erté. ☐ Tarot
☐ Bestiario de Aloys Zötl ☐ Cándido López
☐ ENCOUNTER ENGLISH ☐ Speak english ☐ Improve your english
☐ Perfect your english ☐ Avanced

NOMBRE ____________________
DIRECCION ____________________
POBLACION ____________________ TFNO. ________
CODIGO POSTAL ________ PROFESION ____________________
FECHA ____________________ *Disponible en inglés y francés.



ENCYCLOPÆDIA BRITANNICA



The World's Most Authoritative, Complete, Respected and Honoured International Encyclopaedia.
Encyclopaedia Britannica is published with the editorial advice of Members of the Faculties of the Universities of Oxford, Cambridge, London, Chicago, Toronto, Tokyo, Edinburgh and the Australian National University.

1768 — 1986

大英百科全書

大英百科全書（Encyclopaedia Britannica）[illegible]

P'ENG KO

CONVIERTA A SU HIJO EN UN TRIUNFADOR

En 1929 compré una edición de segunda mano de la Encyclopædia Britannica. Alfonso Reyes me dijo: **«La Encyclopædia Británnica es un excelente compañero de trabajo». De allí salió toda mi obra posterior.** Por eso algunas personas creen que soy más erudito de lo que soy.
No bebo, no fumo, como poco. Mis únicos vicios son leer la Encyclopædia Britannica y no leer a Enrique Larreta.

Jorge Luis Borges
Dic. Privado. Edit. Altalena. Pág. 27

«Cada mañana lo primero que hago es leer durante dos horas la Encyclopædia Britannica.»

Aldous Huxley

NEW EDITION



«Alguna vez oí decir que Aldous Huxley había leído hoja por hoja los treinta volúmenes de la Encyclopædia Britannica, y durante años soñé con repetir esa proeza agotadora y fructífera.»

(Gabriel García Márquez)
Premio Nobel de Literatura 1982

En el mes de agosto adquirí de Vds. la «Encyclopædia Britannica» y les aseguro que es la mejor inversión que he realizado en toda mi vida.

Carmen Isasi
(Profesora de inglés)

«La Encyclopædia fue comprada con vista a las necesidades de mi hijo que habla inglés y siente gran simpatía e interés por este idioma. En este sentido **puedo asegurarle que, aunque el niño no tenga más que trece años, consigue manejar muy bien los tomos y le saca, a su nivel, gran provecho.»**

J. Frequito – Las Palmas.

«Cuanto más trabajo con ella y le descubro todos los rincones, más me admira.»

Alberto Iniesta – Obispo.

«Owning the new Encyclopædia Britannica is rather like having money in the bank. Tough the interest rate may not be as high as you might find elsewhere, it is like an intellectual credit card: you can use it for so many different needs.»

(Anatole Broyard,
The New York Times)

«Mortimer Adler y Warren Preece decidieron adoptar una estructura revolucionaria, de acuerdo con las exigencias de nuestro tiempo y crear una obra acorde con las innovaciones científicas y las técnicas modernas. Optaron por crear una obra enciclopédica para el hombre de hoy, especialista o no.»

(La Vanguardia)

RESPUESTA COMERCIAL
Autorización n.º 4165
B. O. C. 189 de 22-12-77

A FRANQUEAR EN DESTINO

NO NECESITA SELLO

S. A. EBRISA
Apartado F. D. 184
08080 - Barcelona

EDICION 1986

ENCYCLOPÆDIA BRITANNICA 3

is equivalent in content to a library of 1.000 ordinary volumes covering a vast range of subjects.

- **26,000 Illustrations**
- **2,000 Maps**
- **2,5 Million Man Hours**
  (15 Years in the Making)
- **46,142 Pages**
- **46 Million Words**
- **106,421 Articles**

mente como un cuerpo rígido, ya que los movimientos creados por efectos de cizalladura se disipaban debido a la viscosidad. De otra parte, la compresibilidad de la Tierra es tal que si su composición sólo fuese la del manto terrestre y, por tanto, sólo estuviese compuesta de silicatos, la densidad central sería unas dos veces superior a la densidad media. La Tierra es por consiguiente suficientemente compresible para que, considerada como un cuerpo rígido en rotación, no pueda girar lo bastante deprisa para provocar una inestabilidad que conduzca a la fisión. Pero, si por cualquier razón por ejemplo debido al impacto de un planetoide, la velocidad de la Tierra hubiese aumentado considerablemente, se habría formado un anillo ecuatorial que se habría hecho inestable, y la materia habría escapado desde el ecuador (fig. 3). Esta masa eyectada habría constituido un anillo alrededor de la Tierra, a partir del cual se habría podido formar luego la Luna igual que en la hipótesis de la fisión modificada.

Aunque este modelo de pérdida de masa puede explicar en principio la creación de la Luna a partir del manto terrestre, presenta sin emabargo un inconveniente común a todos los modelos de fisión por rotación. En efecto, ya en 1909 hacía notar F.R. Moulton que el momento cinético actual del sistema Tierra-Luna representa menos de la cuarta parte del momento cinético necesario para la fisión. Es dudoso que la Tierra, formada por acreción de planetoides, haya podido adquirir durante su historia un momento cinético tan importante; de otra parte, se ignoran las razones por las cuales pudo disminuir luego suficientemente en el curso del tiempo. Por tanto, se puede afirmar actualmente que esta teoría de la fisión, al menos en su versión original, ha perdido prácticamente a todos sus partidarios.

La hipótesis del planeta doble

Sólo mucho más recientemente surgió una segunda hipótesis sobre la formación de la Luna. En 1960 el soviético E.L. Ruskol (O. Yu. Schmidt Institute of Earth Physics) propuso por primera vez el modelo llamado de acreción binaria o, más sencillamente, del planeta doble. Según este modelo, la Luna se formó también a partir de un anillo de materia en órbita terrestre, pero aquí el anillo surgió por un mecanismo distinto. Imaginemos, por ejemplo, colisiones de planetoides en las cercanías de un primer esbozo de la Tierra. Éstos pudieron ser capturados por la atracción del planeta y permanecer en órbita a su alrededor engendrando un enjambre. Si de este modo fue capturado un número suficiente de planetoides, éstos colisionaron con otros, lo que alimentó la cantidad de materia del enjambre, que si adquirió un momento cinético importante debido a los impactos entre los diferentes planetoides que lo constituían, tuvo que extenderse en forma de un delgado anillo en el plano ecuatorial de la Tierra en formación (fig. 4). Uno de los aspectos seductores de este modelo es que prevé que en cierto modo el enjambre hará la función de un filtro químico, capturando preferentemente los planetoides silicatos de composición parecida a la del manto terrestre.

En efecto, se puede admitir que los fragmentos silicatados son menos densos y, por tanto, menos másicos que los fragmentos férreos procedentes de la dislocación anterior del embrión de un planeta ya diferenciado en un núcleo metálico y un manto silicatado. De donde que el enjambre capturará más silicatos que hierro, mientras que los fragmentos férreos se abrirán camino a través del enjambre. Este proceso podría explicar pues la composición química de conjunto de la Luna, de su pobreza en sustancias volátiles y de otros indicios que incitan a creer que la materia lunar no tiene un origen terrestre.

Pero el modelo de la acreción binaria padece el mismo defecto que los modelos de fisión: la insuficiencia del momento cinético del sistema. En efecto, el momento cinético total del enjambre capturado tiene que haber sido elevado para evolucionar hasta un disco. Pero corresponde a la suma de las aportaciones de cada planetoide capturado, y hay tantas posibilidades de que la captura tenga lugar en el sentido directo, es decir, en el mismo sentido que el del movimiento de los planetas alrededor del Sol, como en sentido retrógrado (sentido inverso). Por tanto, incluso la captura de un número suficiente para hacer posible un efecto de filtro químico no podría proporcionar el equivalente del momento angular actual del sistema Tierra-Luna. Sólo en el caso de trayectorias orbitales muy atípicas de los planetoides incidentes (que hiciesen posible una mayor velocidad), el momento cinético se acercaría al mínimo requerido.[7,8] Sin embargo, como éstas trayectorias no representan más que una pequeña proporción de las trayectorias posibles, está claro que el momento cinético total no habría sido suficiente

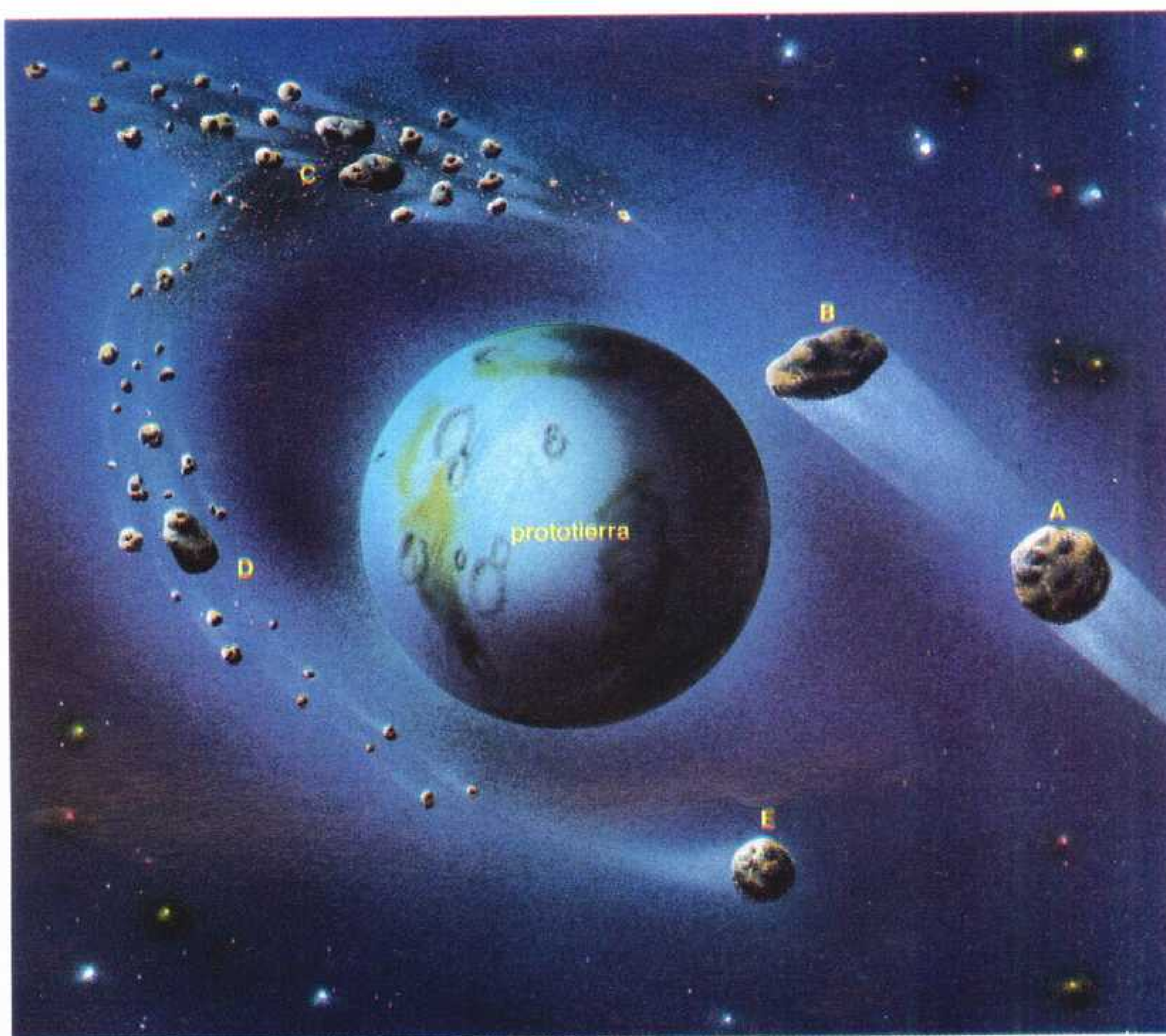


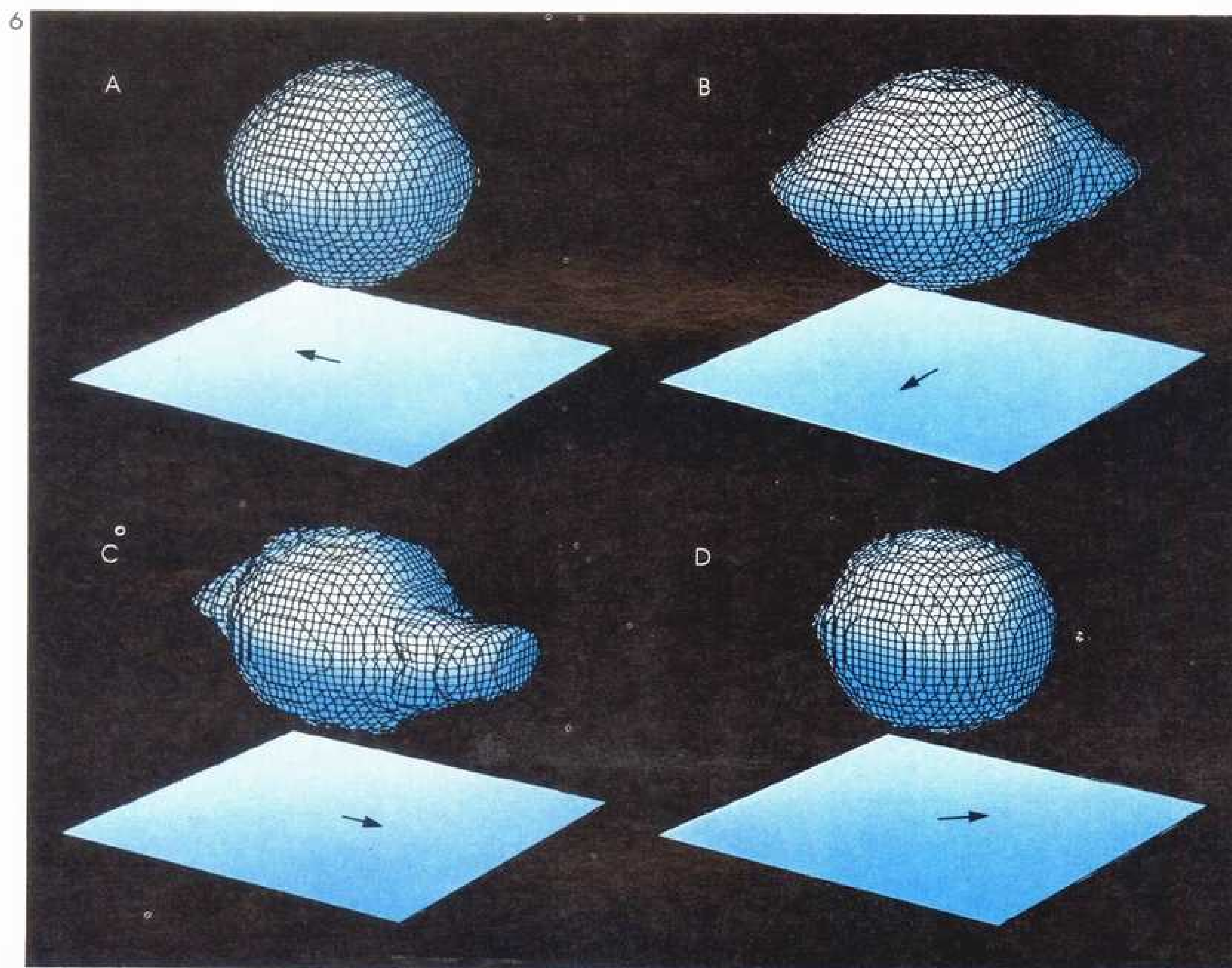
Figura 5. Varias hipótesis sobre el origen de la Luna se basan en su captura por la Tierra. Entre estas hipótesis, una de las más conocidas propone la dislocación, por efecto de las mareas, de un primer esbozo de Luna o protoluna (en realidad un gran planetoide). Esta protoluna (A en el dibujo) más másica que la Luna actual habría penetrado en el interior del llamado límite de Roche, región en cuyo interior todo cuerpo es disgregado por las fuerzas de marea B y C en el dibujo). El límite de Roche de la Tierra corresponde a unos tres radios terrestres. La protoluna dislocada se habría transformado en una nube de residuos empobrecidos en elementos volátiles. Parte de estos residuos habrían escapado de la atracción terrestre, otra parte habría caído sobre la Tierra, y finalmente, una última parte habría permanecido en órbita alrededor de la Tierra (D en el dibujo) para engendrar la Luna (E en el dibujo). (Dibujo según los autores.)

(6) A. P. Boss *Icarus, 66,* 330, 1986.
(7) A.W. Harris, *Icarus, 31,* 168, 1977
(8) F. Herbert *et al. Lunar Planet. Sci., 16,* 341, 1985

Figura 6. Simulaciones en ordenador permiten actualmente eliminar la hipótesis de la captura ilustrada en la figura precedente. En efecto, el gran planetoide que habría pasado por las proximidades de la Tierra no podía haber sufrido una fusión completa y era, por tanto, bastante viscoso. Además, sólo habría estado dentro del límite de Roche durante unas pocas horas. Si se integran estos datos en el modelo, la simulación muestra entonces que el planetoide no puede ser disgregado por las fuerzas de marea. Esto es lo que ilustra esta figura con las etapas de la disgregación abortada del planetoide. Las flechas están orientadas hacia la Tierra, que no está representada. Debido a la viscosidad del planetoide, sólo una pequeña fracción de su masa (D) se pierde durante su paso por las cercanías de la Tierra. Por tanto, el mecanismo de fragmentación por las mareas no permite obtener una cantidad suficiente de materia en órbita terrestre para originar la Luna. (Según A.P. Boss, enero de 1986[23] © Science, 231, 341).

Figura 7. Más recientemente se ha emitido una nueva hipótesis, según la cual la Luna habría surgido de la colisión entre una Tierra en formación, o prototierra, y un embrión de otro planeta, o protoplaneta. Esto es lo que ilustra esta figura en la que se puede ver al protoplaneta (en A), cuya mesa es equivalente a la del planeta Marte, precipitarse violentamente sobre la prototierra. La colisión (en B) habría sido de extraordinaria violencia, y los residuos procedentes a la vez de la prototierra y del protoplaneta habrían sido proyectados en parte en órbita alrededor de la Tierra (en C), formando luego un disco de acreción (en D) a partir del que se habría formado luego, la Luna (en E).

6



7



para impedir que el enjambre en rotación alrededor de la Tierra fuese a su vez capturado por nuestro planeta. De ahí que, al igual que la hipótesis de la fisión, la de la creación binaria ha sido actualmente abandonada por la mayoría de las investigaciones.

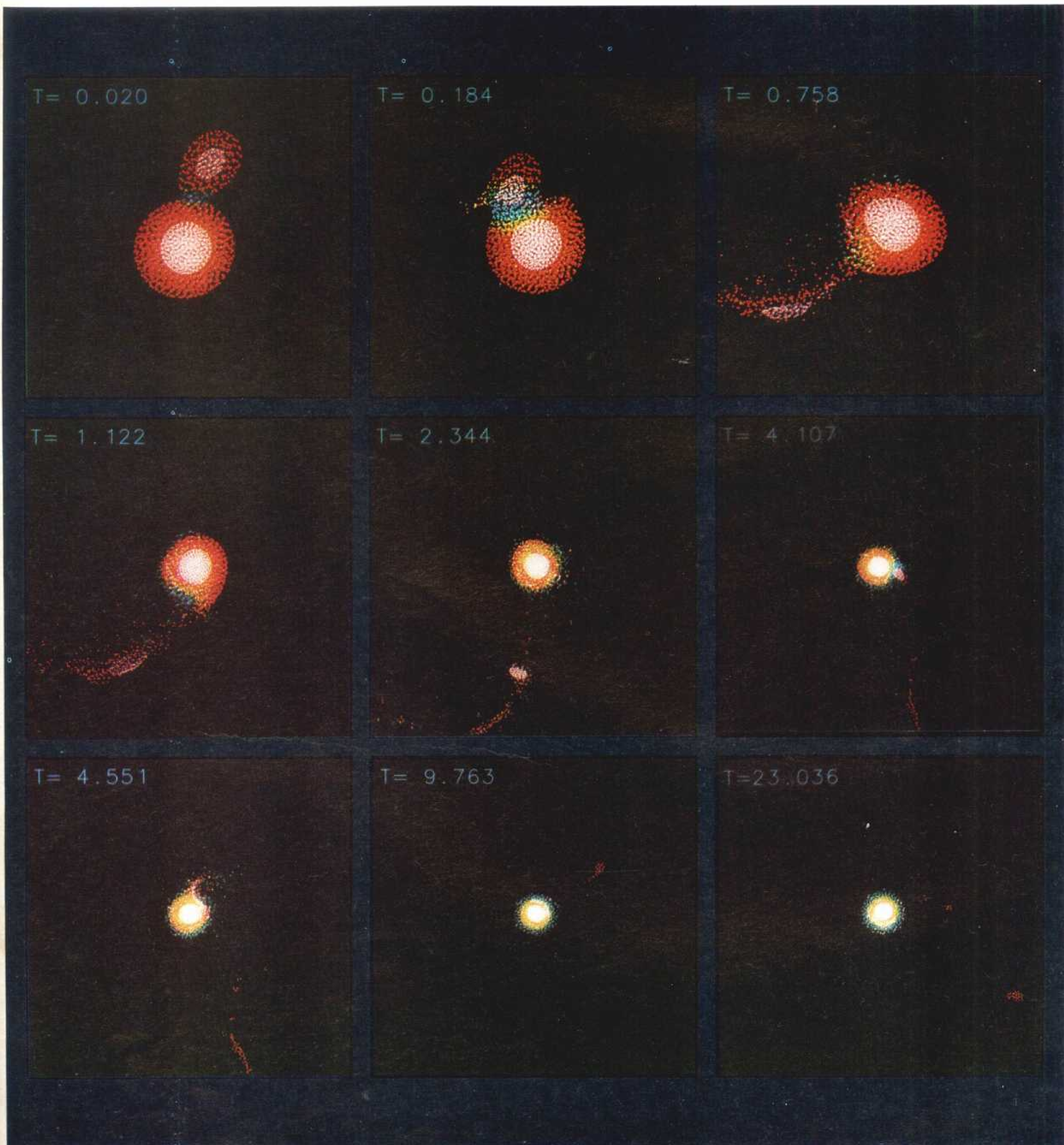
La Luna capturada por la Tierra

Aproximadamente en la misma época que la hipótesis de la acreción binaria, se adelantó un tercer modelo sobre la formación de la Luna. Se trataba del modelo de la captura de la Luna por la Tierra, que fue propuesto por vez primera por el alemán occidental H. Gerstenkom en 1955. Este modelo iba a aportar una solución al problema de la insuficiencia del momento cinético. En su virtud, la Luna se habría formado en algún lugar en la región de los planetas telúricos, en una órbita bastante próxima a la Tierra antes de ser capturada por ésta. La captura de un satélite por un planeta parece mucho más probable cuando sus órbitas están próximas (encuentro próximo). Si por ejemplo, la distancia entre la Tierra y la Luna en el momento de su encuentro era del orden de tres radios terrestres (más lejos la captura resulta imposible ya que la disipación de energía necesaria para el frenado de la Luna resulta demasiado pe-

Figura 8.** Simulaciones detalladas permiten hoy verificar la hipótesis del impacto gigante ilustrado en la figura precedente. La aquí representada nos muestra las etapas sucesivas de una colisión a una velocidad de 11 kilómetros por segundo entre la Tierra (en el centro) y un cuerpo siete veces menos másico (arriba a la derecha). Al principio los dos cuerpos poseen un núcleo rico en hierro (representado en violeta) rodeado de un manto silicatado (en rojo). En adelante se representa una gradación de colores en el manto en función de la energía interna que va del rojo (baja energía) al azul (alta energía). Esto permite visualizar el desplazamiento del frente de la onda de choque. El tiempo transcurrido a partir del inicio del impacto se da en cada instantánea, arriba a la izquierda, en horas. La variación del tamaño de la Tierra hacia el final de la secuencia se debe a cambios de escala. Éstos implican, por otra parte, una sobreexposición de la Tierra en las tres últimas fotografías, de ahí su color blanco. Se puede apreciar que, después de la colisión, el planeta incidente, parcialmente disgregado, se dispersa en el espacio. Una parte de sus restos vuelven a unirse entonces por autogravitación: 2,26 horas después del inicio del impacto, el núcleo está completamente separado del manto. Unas 4 horas después del inicio de la colisión, el núcleo choca de nuevo con la Tierra para ser absorbido por ésta, dejando en órbita un fragmento silicatado de masa casi igual a la de la Luna. ¡Todo ello en menos de 24 horas! La evolución ulterior de este fragmento sigue siendo incierta ya que se halla en las proximidades del límite de Roche. Si fuese demasiado frenado por la presencia de gas, penetraría en el interior de esta zona, sería destruido y se produciría la formación de un disco de acreción protolunar. Actualmente este modelo del impacto gigante parece el más plausible, ya que es el único que responde a los condicionamientos impuestos por los datos de las misiones Apollo y por los estudios teóricos.

queña), en el momento cinético del sistema Tierra-Luna sería igual a la sexta parte del momento cinético actual. Este déficit de momento angular habría podido corregirse haciendo intervenir en el modelo algunos planetoides que colisionasen tangencialmente con la Tierra. Este modelo de captura puede explicar fácilmente las diferencias de composición química entre la Luna y el manto terrestre. En cambio, son las semejanzas de naturaleza química las que son difíciles de explicar. Por ejemplo, si la Luna se formó en la misma región que los demás planetas telúricos ¿cómo explicar que sea más pobre en hierro?

Para terminar, este modelo no propone un mecanismo plausible de captura de la Luna por la Tierra. En efecto, cuando un cuerpo como la Luna, procedente del exterior, se acerca a la Tierra, su trayectoria parabólica respecto a ésta es desviada, pero no lo suficiente para impedirle que regrese de nuevo al espacio. Para que haya captura es necesario un mecanismo de frenado de la Luna suficiente para que la órbita de la Luna, inicialmente parabólica o hiperbólica, se haga elíptica con centro en la Tierra. Este frenado podría proceder de la disipación de energía por efecto de las mareas durante un paso muy próximo de la Luna, pero ésta disipación parece demasiado pequeña para provocar una captura, salvo en el caso de que la órbita de la Luna está muy cerca de la Tierra, en el que la captura no requiere más que una pequeña disipación de energía cinética. Pero es muy improbable que la Luna se haya formado en una órbita como ésta. Si tal fuese el caso, bien habría chocado con la Tierra, bien



Conclusión de las simulaciones: una gigantesca colisión con un planeta del tamaño de Marte.

habría sido eyectada a una órbita alejada en una de las numerosas aproximaciones ocurridas durante el período de formación de los planetas. En cambio, si la Luna se hubiese formado en la región de los planetas telúricos y hubiese sido desviada ulteriormente hacia la Tierra, su velocidad habría sido demasiado grande para que hubiese captura.

Uno de los procesos de captura más conocidos propone la dislocación por efecto de las mareas de una primera Luna en formación llamada protoluna. Esta hipótesis se basa en los trabajos de E. Roche en 1847. Éste demostró que un satélite fluido en órbita circular alrededor de otro cuerpo sólo puede ser gravitatoriamente estable si la distancia entre los dos cuerpos supera un valor límite, que se llama límite de Roche. Cualquier satélite fluido en órbita circular en el interior de este límite sería disgregado por las fuerzas de marea. En efecto, la diferencia entre las fuerzas ejercidas por el cuerpo central sobre el lado próximo y el lado alejado del satélite es superior a la fuerza de cohesión de éste. Por consiguiente, cualquier cuerpo relativamente voluminoso que entrase en el interior del límite de Roche, que para la Tierra corresponde a unos tres radios terrestres, sería disgregado por las mareas. El resultado sería la creación de una nube de residuos empobrecidos en sustancias volátiles, residuos una parte de los cuales permanecería en órbita terrestre para engendrar la Luna (fig. 5). Además, en la hipótesis, si la Luna hubiese contenido un núcleo metálico éste habría podido escapar, lo que explicaría a la vez las diferencias y las semejanzas de composición química de la Tierra y la Luna. Lamentablemente en este modelo de disgregación por las mareas no se tiene en cuenta la viscosidad. El análisis de Roche se aplica a cuerpos fluidos no viscosos; pero un planetoide del tamaño de la Luna todavía es menos susceptible que la Tierra de sufrir una fusión completa y de ser pues fluido. Además, en el análisis de Roche, la disgregación del cuerpo no depende directamente del tiempo; pero un primer esbozo de la Luna, o protoluna, que pasase por las cercanías de la Tierra sólo estaría dentro del límite de Roche durante unas horas como máximo. En realidad, de los cálculos efectuados en 1985 por H. Mizuno y uno de nosotros (A. P. Boss) resulta que un planetoide moderadamente viscoso que pasase holgadamente por el interior del límite de Roche no podría ser disgregado por las mareas[9] (fig. 6), y mucho menos si se trata de un cuerpo muy viscoso que sólo permanece en las proximidades del planeta algunas horas. También en este caso, los trabajos teóricos recientes permiten eliminar esta hipótesis de la captura.

Hacia la mitad de los años setenta e independientemente W. K. Hartmann y D. R. Davis del Planetary Science Institute en Tucson[1] y A. G. W. Cameron y W. R. Ward, de la Universidad de Harvard,[11] emitieron por primera vez la hipótesis de que la Luna habría surgido de la colisión entre un primer esbozo del planeta Tierra, o prototierra, y un embrión de otro planeta o protoplaneta.

Al exigir que el momento cinético del sistema prototierra-protoplaneta sea comparable al del sistema Tierra-Luna que conocemos actualmente, A. G. W. Cameron y W. R. Ward dedujeron que el protoplaneta incidente tenía que ser al menos tan másico como Marte (aproximadamente un décimo de la masa terrestre y la mitad de su radio) y que la velocidad de impacto tenía que ser de unos diez kilómetros por segundo en el caso de una colisión prácticamente tangencial. En esta hipótesis, los residuos de la colisión habrían sido proyectados en órbita alrededor de la Tierra formando luego un disco de acreción. Los fenómenos de viscosidad serían los que habrían provocado el alejamiento más allá del límite de Roche de una parte del disco, a partir del cual habría nacido la Luna[12,13] (fig. 7). Durante muchos años, esta teoría no atrajo mucho la atención ya que se consideraba muy improbable la existencia de estos impactos gigantes. Pero los recientes progresos de la teoría general sobre la formación de los planetas[14] que hemos esbozado en la primera parte de éste artículo han demostrado que estos impactos son en realidad muy verosímiles. Ahora, gracias a los ordenadores modernos ultrarrápidos, se puede simular detalladamente el desarrollo de las colisiones; de ahí el renovado interés por esta teoría de los impactos gigantes que entre otras, se ha manifestado con ocasión del coloquio de Kona en 1984 sobre el origen de la Luna. En esta ocasión A. G. W. Cameron presentó los resultados de simulaciones numéricas de un impacto gigante.

Aunque estas simulaciones habían sido muy aproximadas, demostraban que la formación por impacto de un disco de acreción de masa superior a la de la Luna era posible en el caso de una colisión muy másica. A partir de estos resultados, quedaba claro que se imponían simulaciones más detalladas. Éstas acaban de ser realizadas por uno de nosotros (W. Benz) en colaboración con W. L. Slatery y A. G. W. Cameron en el Laboratorio Nacional de Los Alamos.[16,17] Se han simulado colisiones entre la Tierra en formación y planetas incidentes más pequeños con objeto de descubrir las condiciones iniciales que darían lugar a la formación de la Luna, bien directamente, bien a partir de un disco de acreción (disco protolunar).

En estas simulaciones se supone que los dos planetas ya están diferenciados; cada uno presenta un núcleo ferroso que contiene la tercera parte de la masa del planeta, rodeado de un manto de granito. Las propiedades de los materiales, tanto sólidos como líquidos y gaseosos, así como su comportamiento se han modelizado por medio de una ecuación de estado apropiada.[18] Se ha situado a los dos planetas en trayectorias que conducen a una colisión. El ordenador ha simulado entonces la sucesión de acontecimientos. En cada simulación el momento cinético total sólo supera en algún tanto por ciento al momento cinético total del sistema Tierra-Luna actual. De hecho, para una velocidad de impacto dada, el desarrollo de los impactos solo varía en función de la masa del planeta incidente.

Colisiones en ordenador

En general, durante una colisión, el planeta incidente es deformado por las fuerzas de marea al acercarse a la Tierra. Luego, tras el choque inicial, su velocidad disminuye, ya que la energía cinética se ha disipado en forma de calor durante el choque extraordinariamente violento que tiene lugar en la interfacies de los planetas. Los materiales son pulverizados y se vaporizan formando chorros de materia. La mayor parte de este vapor vuelve luego al estado sólido cuando la expansión, al provocar el enfriamiento del gas, disminuye la energía interna por debajo de la energía de vaporización. A continuación, se observa que la evolución del proceso depende estrechamente de la relación entre la masa del planeta incidente y la de la Tierra. Si el planeta incidente es relativamente másico (cociente entre las masas superior a 0,17) queda en órbita menos de la mitad de una masa lunar para formar un disco de acreción, y una cantidad aproximadamente equivalente de residuos es proyectada fuera del sistema en forma de chorros a gran velocidad. En este caso, la mayor parte de la materia es suficientemente frenada para aglutinarse a la Tierra. El disco de acreción en órbita alrededor de la Tierra contiene muy poco hierro, ya que el núcleo ferroso del planeta incidente es completamente absorbido por la Tierra y va a unirse al núcleo terrestre, lo que explicaría la pobre composición en hierro de la Luna; pero, de otra parte, la masa demasiado pequeña del disco no permite sostener la hipótesis de la colisión con un gran planeta.

Si el planeta incidente es pequeño (cociente de masas inferior a 0,12), no es destruido en el primer impacto. Rebota a una órbita muy excéntrica que termina en un segundo impacto al cabo de una sola revolución. Entonces el planeta incidente se disgrega totalmente y se dispersa formando un disco. Pero, en este caso, se observa que el disco contiene casi todo el hierro contenido al principio en el núcleo del planeta incidente (núcleo cuya masa es de algunas

(9) H. Mizuno, A. P. Boss, *Icarus, 63,* 109, 1985.
(10) W. K. Hartmann, D. R. Davis, *Icarus, 24,* 504, 1975.
(11) A. G. W. Cameron, W. R. Ward, *Lunar Planet. Sci., VII,* 120, 1976.
(12) W. R. Ward, A. G. W. Cameron, *Lunar Planet. Sci., IX,* 1205, 1978.
(13) A. C. Thompson, D. J. Stevenson, *Lunar Planet., Sci., XIV,* 787, 1983.
(14) G. W. Wetherill, *Science, 228,* 877, 1985.
(15) A. G. W. Cameron *Icarus, 62,* 319, 1984.
(16) W. Benz *et al., Icarus, 66,* 515, 1986.
(17) W. Benz *et al., Lunar Planet Sci, XVII,* 40, 1986.

masas lunares). ¡No está claro en este caso cómo podría formarse una Luna empobrecida en hierro a partir de un disco muy rico en este metal! Por tanto, la hipótesis de una colisión con un pequeño protoplaneta queda a su vez descartada.

Pero queda una zona intermedia (en la que el cociente de masas está comprendido entre 0,12 y 0,16) donde la cantidad de materiales proyectados en órbita equivale a más de una masa lunar y media. Por ejemplo, con un cociente de masas igual a 0,14 (el planeta incidente tendría unas 1,2 veces la masa del planeta Marte) (fig. 8), la simulación prevé la puesta en órbita de un gran fragmento de masa igual a la de la Luna acompañado de un disco de masa igual a aproximadamente la mitad de la de la Luna. En todos los casos de esta zona intermedia, la cantidad de hierro que termina en el disco o en el fragmento es muy pequeña. En efecto, la simulación muestra que el núcleo ferroso del planeta incidente se separa del manto silicatado poco después del inicio de la colisión y cada uno evoluciona de forma distinta. Luego el núcleo rebota a una trayectoria muy excéntrica, que termina con un nuevo impacto con la Tierra en el que es absorbido. La Tierra y este núcleo en órbita ejercen sobre las rocas en órbita un par de fuerzas suficiente para que esta materia no vuelva a caer sobre la Tierra. La evolución ulterior del gran fragmento en órbita es imprecisa. Por ejemplo, puede penetrar en el interior del límite de Roche, y entonces se disgregará antes de extenderse en forma de disco. La temperatura de los materiales puestos en órbitas según este modelo es suficientemente elevada para que las sustancias volátiles escapen fácilmente durante el impacto más tarde en el disco. Al final, el noventa por ciento de los materiales en órbita provienen del planeta incidente. Todos estos elementos podrían dar razón de las diferencias de composición química entre la Tierra y la Luna.

Este modelo del impacto gigante parece pues superar todas las dificultades procedentes del momento cinético y de la composición química, dificultades que parecían fatales para las otras teorías sobre la formación de la Luna. Además, como hemos visto, este modelo está en completo acuerdo con la teoría actual sobre la formación de los planetas telúricos. Sin embargo, para que estas recientes simulaciones reproduzcan exactamente el proceso de formación de la Luna es necesario que la composición química del planeta incidente sea parecida a la Luna (salvo especialmente el caso de elementos como los volátiles que se pierden durante la colisión). Esta exigencia parecía muy restrictiva para el modelo. Podría serlo menos si se admite la nueva hipótesis propuesta en 1986 por H. J. Melosh y sus colaboradores:[19,20] una gran parte de los materiales prelunares provendrían de los chorros de vapores que se forman en el momento del impacto. Según esta variante del modelo, aproximadamente la mitad de los materiales proyectados por los chorros provenían del manto terrestre. Muy recientemente, A. E. Ringwood, de la Universidad Nacional de Australia, aseguraba incluso que algunas semejanzas entre las composiciones químicas de la Luna y de la Tierra (por ejemplo, en elementos siderófilos, es decir parecidos al hierro) son tales que implicarían que la Luna se ha formado totalmente a partir del manto terrestre.[21] Esta conclusión es muy discutida. Por ello se está realizando una nueva serie de simulaciones que reúne a uno de nosotros (W. Benz) y a H. J. Melosh y sus colaboradores, con objeto de determinar cuál es la máxima porción de rocas terrestres que puede ser puesta en órbita tras un impacto gigante.

Hasta ahora, parece que el modelo del impacto gigante es el único que satisface las diferentes condiciones impuestas por los datos de las misiones Apollo y por los estudios teóricos. Incluso sería tentador invertir el problema y afirmar que la existencia de la Luna constituye el testimonio más elocuente que puede haber de la existencia de colisiones gigantes en el pasado. Por tanto la teoría actual de la formación de los planetas telúricos se revelaría exacta en sus grandes líneas. Si es éste el caso, la intuición de Harold C. Urey alcanzaría finalmente sus frutos: la Luna contiene la clave, no sólo de su propia formación, sino también de la de los otros planetas. ■

Para más información:

- V. S. Safronov, *Evolution of the protoplanetary cloud and formation of the Earth and the planets*, Nauka, Moscú, 1969; traducido al inglés por Israel Program for Scientific Translation, NASA TT F-677, 1972.
- A. E. Ringwood, *Origin of the Earth and Moon*, Springer Verlag, nueva York, 1979.
- W. K. Hartmann, R. Phillips y G. J. Taylor (eds.), *Origin of the Moon*, Lunar and Planetary Institute, Houston, 1986.
- P. Moore, *La Luna*, Hermann Blume, Madrid, 1986.

(18) J. H. Tillotson, *General Atomic Report GA-3.216*, 1962.
(19) H. J. Melosh C. P. Sonett, *in Origin of the Moon*, W. K. Hartmann *et al.*, (eds.), Lunar and Planetary Institute, Houston, 1986, p. 621.
(20) M. E. Kipp, H. J. Melosh, *Lunar Planet. Sci.*, *XVII*, 420, 1986.
(21) A. E. Ringwood, *Nature*, *322*, 323, 1986.
(22) A. P. Boss, S. J. Peale, *Origin of the Moon*, Lunar and Planetary Institute Houston, 1986, p. 59.
(23) A. P. Boss, *Science*, *231*, 341, 1986.

El análisis automático de la escritura

por Daniel Charraut, Jacques Duvernoy y Louis Hay

¿Qué puede esperarse de la utilización de la imaginería óptica en el análisis de un manuscrito? No solamente, como podría pensarse, la detección de falsificaciones, sino muchas otras cosas. Con un haz láser, un holograma y un ordenador, además de algunos modelos matemáticos, es ya posible determinar si un manuscrito ha sido redactado desde el principio al fin por una misma persona y escrito el día de su fecha. De esta manera puede seguirse el envejecimiento de una escritura y fechar un manuscrito. Los manuscritos de Heinrich Heine, Paul Claudel y Gérard de Nerval han sido ya estudiados y los resultados de este análisis óptico han enriquecido -modificándola a veces- la comprensión que la crítica literaria tenía de la obra de estos autores.

La invención de la escritura hizo que la humanidad pasara de la prehistoria al período histórico. Ha aportado a los hombres «toda la memoria del mundo» y su más vasto sistema de comunicación a través de los tiempos y del espacio. Las civilizaciones de la escritura fueron desarrollándose progresivamente a través de Asia, Europa, América y África del Norte, y hoy abarcan casi todo el planeta. Pero, a pesar de su realidad milenaria y universal en la que estamos inmersos sin que muchas veces seamos conscientes de ello, la escritura sigue siendo, paradójicamente, un fenómeno mal conocido, tanto que su comprensión plantea todavía hoy ciertos problemas a la ciencia.

Esta situación se debe, por una parte, al desarrollo relativamente tardío de las investigaciones sobre las escrituras y, por otra parte, a su enfoque sobre problemas de tipo histórico y social: descifrado de escrituras desaparecidas, estudio de los orígenes, de su ubicación y de la difusión de este «gran invento», así como la historia de las instituciones y de las formas. Por esto han quedado en suspenso algunos problemas fundamentales.

Para empezar: ¿cuál es la naturaleza del fenómeno? ¿Se trata del «arte de pintar la palabra»? ¿Es la escritura un invento secundario en comparación con la palabra? Ésta es, sobre todo desde F. de Saussure, la opinión mayoritaria de los lingüistas: los alfabetos occidentales sólo ofrecen una transcripción de los sonidos (bien o mal, pero esto es otra cuestión). ¿Hay que admitir, por el contrario, entre «corriente de aire» y «corriente de tinta» una diferencia de sustancia y, por tanto, de naturaleza? Defendida por L. Hjemslev y los lingüistas de su escuela, esta posición queda matizada por otros, como J. Vaček, que consideran los dos sistemas como síncronos y relativamente autónomos: habla y escritura serían las dos vertientes de un mismo fenómeno. A fin de cuentas, se trata nada más y nada menos de saber si la humanidad se ha dotado de un lenguaje (hablado) que, a continuación y por sucesivos reflejos (imágenes, escrituras) se fue desmultiplicando, o bien si esta misma humanidad se comunica por canales plurales. El reto práctico del problema es muy importante en el campo de la comunicación social, principalmente para una mejor inteligencia y un mayor dominio de los sistemas audiovisuales. Pero no es menor el reto teórico, y resulta sorprendente ver que algunas propiedades fundamentales del lenguaje escrito, como su relación con el espacio (en el que se inscribe en dos dimensiones), con el tiempo (que puede invertirse mediante correcciones y retornos atrás), con el mensaje (que perdura aún sin la presencia del autor o del lector) y, en definitiva, todos los rasgos que lo distinguen del lenguaje oral, sólo empiezan a introducirse en el campo de la investigación científica.

Y luego, otra pregunta: ¿cómo se escribe? Charles Darwin fue el primero en definir el acto de escribir como «una combinación de estructuras físicas, de características psíquicas y de aprendizajes», anticipándose así a los trabajos actuales de neurofisiología, psicología experimental y comunicación. Estos trabajos perfilan progresivamente el contorno de un campo de investigaciones, que son a la vez fundamentales y aplicadas, que van desde el estudio de los procesos mentales hasta los tratamientos informáticos de los textos, en que la escritura surge como un nuevo objeto científico.(1) Las investigaciones a que ha dado lugar en la mayor parte de los países avanzados nos son actualmente familiares a nivel de su desarrollo y de sus aplicaciones: revelación de trazados invisibles para el ojo humano (metodología óptica *o* numérica), puesta a punto de lectores ópticos para cursiva estandarizada (metodología óptica *y* numérica), experimentos de peritaje automático (metodología puramente numérica). En Francia ha podido desarrollarse últimamente un enfoque de carácter a la vez fundamental y aplicado. Es el resultado del encuentro de dos modalidades de investigación: la primera, orientada hacia el tratamiento de las imágenes, que tiene en la actualidad una expansión extraordinariamente rápida; la segunda se refiere a la escritura, estudiada hasta ahora sobre todo a nivel de mensaje verbal, de información manifiesta, pero cuyo grafismo encierra también una virtual información de gran interés para el conocimiento del escritor y del escrito. De ahí ha surgido la idea de aplicar las nuevas posibilidades de la imaginería óptica al análisis de los grafismos para acceder a una información inédita aprendiendo a leer «el lenguaje de los trazos».

La puesta en práctica en este proyecto se ha visto favorecida en Francia por las bazas de que dispone el Centro nacional de investigación científica (CNRS). Bien implantado en todos los campos que pueden ofrecer colaboración (el Instituto de óptica teórica y aplicada y el Laboratorio de holografía y tratamiento de la señal, que ha pasado a ser recientemente Laboratorio P.M. Duffieux, por una parte, y el Instituto de investigación y de historia de los textos, IRHT, y el Instituto de textos y manuscritos modernos, ITEM, por otra), ofrece además la ventaja de una estructura unitaria que facilita los programas intersectoriales. Así, desde el

Daniel Charraut es investigador del ITEM, en Besançon. **Jacques Duvernoy** dirige el Laboratorio de óptica P.-M. Duffieux, también en Besançon (UA 214 del CNRS). **Louis Hay** es director de investigación en el Instituto de textos y manuscritos modernos, en París (LP 7 del CNRS).

La escritura puede asimilarse a un sistema de imaginería puesto en funcionamiento por el cerebro.

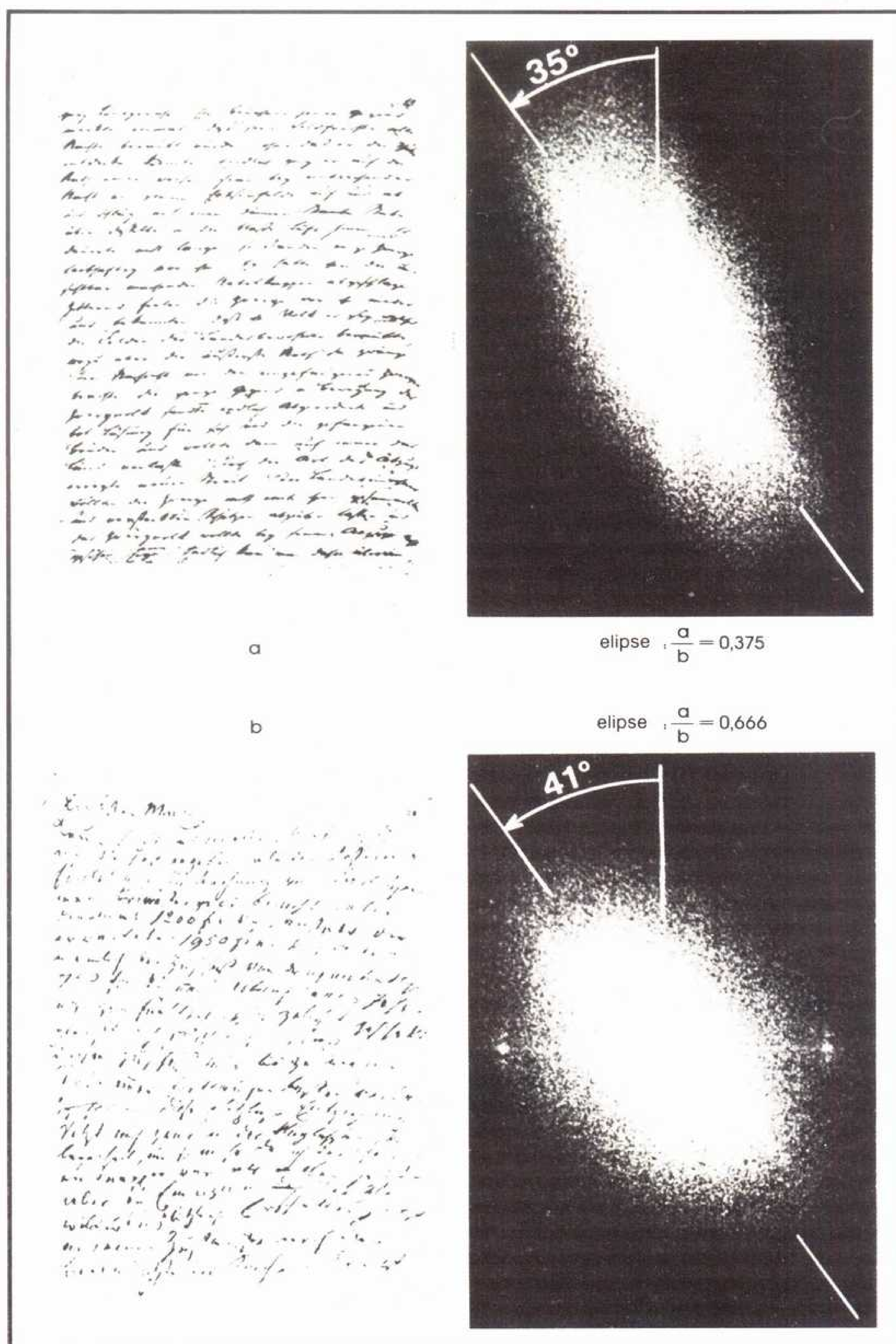


Figura 1. El análisis óptico de la escritura, aparte de la peritación o la detección de falsificaciones, puede revestir otro interés, ya que gracias a él es posible no solamente identificar el autor de un manuscrito, sino observar las modificaciones que su escritura ha sufrido a lo largo del tiempo. Uno de los métodos emplea las técnicas ópticas. Consiste en someter el microfilme negativo de una página (aquí, dos manuscritos del poeta alemán Heinrich Heine) a la acción de un haz láser. Como los contornos de las letras actúan como aberturas de difracción, se obtiene una figura de difracción en forma de elipse. Esta figura permite determinar algunas características medias de la escritura: inclinación de las letras (relacionada con la inclinación de la elipse respecto a la vertical), coherencia del grafismo (coherencia tanto más acusada cuanto menor sea la relación a/b de los ejes de la elipse), desplazamiento entre las líneas, etc. En este gráfico, todos los indicios parecen apuntar a una degradación sensible de la escritura. Indica que el primer escrito (a) fue realizado bastante antes que el segundo (b) (ambos están separados por unos quince años) y que este último hay que fecharlo en un período en que el poeta se hallaba gravemente enfermo.

último decenio, Colette Sirat ha podido establecer una colaboración entre paleógrafos del IRHT, de París, y ópticos del Laboratorio de holografía, de Besançon. Relanzada dentro del marco de un grupo de trabajo «Tratamiento de las imágenes», se ha visto prolongada en un programa del ITEM y del Laboratorio Duffieux, que reúne a investigadores de ciencias humanas y físicos. A los primeros les ha permitido abordar problemas de método –identificación de un escritor, datación de un escrito, clasificación de las páginas de un manuscrito, estudio de las etapas y del progreso de una redacción que han tenido aplicación en el análisis de grandes colecciones de manuscritos y que conducen a cuestiones que, hasta el momento, no habían podido ofrecer soluciones a la historia, a la lingüística y a la creación intelectual. A los segundos les ha brindado nuevos objetos de estudio, a la vez que ha favorecido el desarrollo de metodología que asocian la óptica espectral, los procedimientos ópticos/numéricos, las síntesis de trazados y desembocan en una reflexión fundamental sobre la naturaleza óptica del escrito. Los ejemplos que se dan a continuación pretenden ilustrar la articulación de estos distintos enfoques en una investigación global que converge en la escritura.

La escritura, objeto óptico

Toda operación de escritura va asociada a la formación de una imagen del texto sobre la retina del escritor o del lector. En el momento en que se forma, esta imagen contiene la totalidad de la información vehiculada por el texto. Por tanto, la comunicación escrita pasa toda ella por un canal óptico, por lo que equivale a un sistema de imaginería utilizado por el ojo humano. Este sistema responde típicamente al tratamiento óptico de las imágenes; entra en el campo de una metodología actualmente perfectamente dominada. Así desde hace tiempo, han podido realizarse experimentos de refuerzo del contraste en manuscritos medievales, experimentos que debemos al equipo del profesor Benton, del California Institute of Technology.[2] Pero las posibilidades que actualmente ofrece el tratamiento de las imágenes permiten ir mucho más allá de estas primeras tentativas, para lo cual pueden emplearse varios sistemas de modelización y de cuantificación.

El primero consiste en tratar una página manuscrita como una distribución de valores luminosos, cuya geometría y reparto pueden ser captados directamente con el fin de caracterizar un rasgo. El segundo considera la escritura como un proceso: todo escritor reproduce un modelo colectivo (las letras del alfabeto, si se trata de una escritura occidental) al que aporta una determinada deformación individual; se comporta como un sistema de imaginería, cuyas características pueden ser definidas. Un tercer método consiste en calcular los parámetros de esta deformación partiendo del rasgo; de este modo, se elabora un modelo matemático que define un grafismo individual. Estos tres enfoques se examinarán solamente por el valor que tienen como ejemplo. No se trata de discutir aquí los detalles, ni de presentar un amplio abanico de procesos ópticos/numéricos. Lo que nos interesa es su impacto sobre problemas que esperan solución en el campo de las ciencias humanas y, de manera más

(1) L.W. Gregg, E.R. Steinberg (eds.), *Cognitive processes in writing,* Hillsdale, 1981; S. Grosse (ed.), *Schriftsprachlichkeit,* Düsseldorf, 1983; *La pratique des ordinateurs dans la critique des textes,* Colloque international du CNRS, n.º 579.
(2) J.F. Benton, A.R. Gillespie, J.M. Soha, *Scriptorium, 33,* 1979.

general, sobre nuestra propia comprensión del hecho de la escritura.

En el estudio de la geometría y la distribución de los rasgos, la potencia de los métodos ópticos puede quedar notablemente reforzada si se aplican no al grafismo propiamente dicho, sino a su imagen espectral. Este método se ilustró primero con análisis de fotografías aéreas realizadas por un equipo de la General Motors Corp. en Santa Bárbara, que demostró ya desde 1970 un gran interés en utilizar espectros ópticos para caracterizar la regularidad y la textura de las imágenes.(3) En el caso de la escritura, el método ofrece muchas posibilidad de estudio de los rasgos.

¿Cómo se obtiene el espectro de una página manuscrita? Un microfilme de la página se ilumina con luz coherente (haz láser): los contornos de las letras, transparentes en una película en negativo, actúan como aberturas de difracción, y las figuras así producidas son recogidas por una lente que presenta en su plano focal un espectro de difracción llamado espectro de Fourier. Está modulado en intensidad y en distribución para todas las características del trazado, por lo que éstas son accesibles sin pérdida de información: el espectro constituye, en realidad, un «doble» óptico de la página. Esto hace que puedan observarse directamente cierto número de propiedades, tal como se ve en la figura 1. Los puntos alineados sobre la vertical traducen, por su periodicidad y su número, el reparto de las líneas de la escritura; el ángulo de inclinación de la elipse revela la inclinación media de las letras en la línea; su finura mide la amplitud de las fluctuaciones que sufre esta inclinación. La información relativa a estas tres características básicas puede interpretarse ya de entrada, tal y como demuestra el ejemplo aquí presentado.

Las dos páginas de la figura 1 proceden de una misma mano, la del escritor alemán Heinrich Heine (1797-1856), pero se oponen por el conjunto de sus rasgos: de la muestra (a) a la muestra (b), la fluctuación angular crece, tal y como se ve por el ensanchamiento de la elipse, la inclinación media de las letras va siendo más acusada (pasa de 35° a 41°), la periodicidad vertical disminuye y refleja una creciente irregularidad de la red de las líneas. Todos estos indicios concuerdan en señalar una degradación de la escritura. En realidad, ha podido establecerse que la página (b) había sido escrita quince años después de la página (a) y durante la grave enfermedad del poeta. Así pues, el espectro de estos manuscritos ha puesto a nuestro alcance varios datos ópticos cuya interpretación no requiere una hipótesis previa.

No ocurre lo mismo cuando se trata de acceder al conjunto de la información que vehicula el rasgo y, principalmente, a propiedades de orden estadístico. Es necesario trabajar entonces sobre datos cuantificados, y ya veremos que el espectro de Fourier permite hacerlo instantáneamente. Pero para esta segunda etapa, es importante disponer previamente de un modelo general del proceso con objeto de garantizar la coherencia de los tratamientos numéricos; al propio tiempo, es necesario respetar algunas limitaciones para asegurarse de que estas operaciones corresponden perfectamente al objeto analizado.

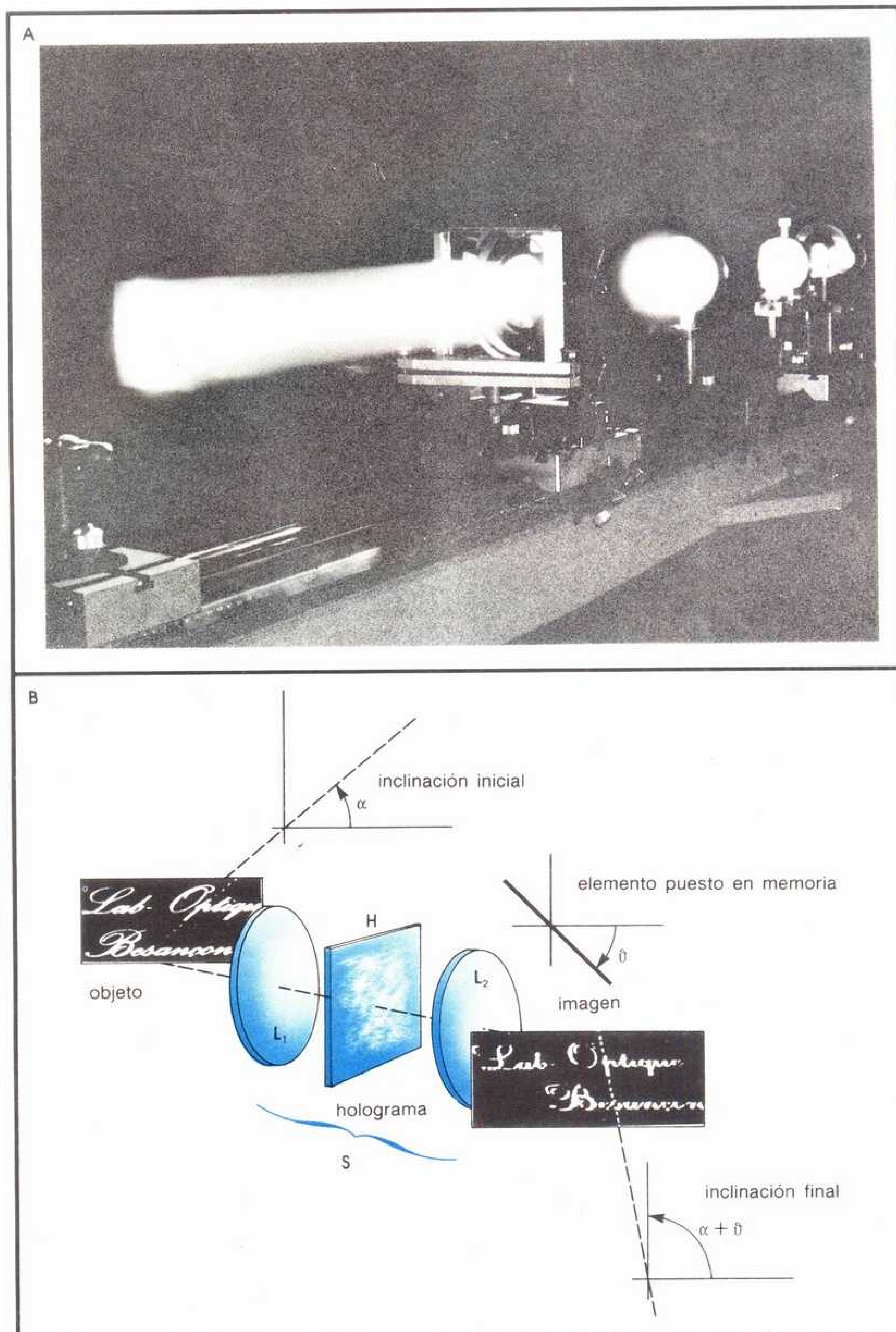


Figura 2. La óptica permite efectuar directamente la síntesis de un rasgo. Aquí, una de las características del grafismo (la inclinación de las letras sobre la línea) ha quedado reconstruida en un banco óptico. El microfilm de un manuscrito ha sido sometido a la acción de un haz láser (A). El espectro de difracción así obtenido pasa a un sistema óptico (S), compuesto de dos lentes (L1 y L2) y un holograma (H) que funciona como una memoria. En este último se registra de algún modo el ángulo de inclinación característico de una escritura. Al atravesar el holograma, la imagen de entrada queda corregida según este ángulo y produce en la salida una imagen reconstruida del grafismo puesto en memoria por el holograma. Un ángulo permite medir la diferencia entre ambas escrituras. (Foto Laboratorio Diffieux, Besançon.)

La mano y la lente

Ya hemos visto que un proceso de escritura puede asimilarse a un sistema de imaginería: el paso de un modelo colectivo a una realización individual equivale a la formación de una imagen llena de aberraciones, y éstas han de calcularse para definir las propiedades de una lente. Es cierto que los trazos muy fluctuantes de la escritura equiva-

(3) G.G. Lendaris, G.L. Stanley, «Difraction-pattern sampling for automatic pattern recognition», *Proceedings IEEE, 2,* 1970.

El análisis de las fluctuaciones de los rasgos de la escritura puede permitir la identificación de un escritor.

A 1

2

B

3

C

Figura 3. En los papeles de Heinrich Heine aparecen las manos de varios secretarios. De ellos, tres son conocidos; otros escritos están todavía sin identificar. ¿Fueron escritos por una o por varias personas? Diez páginas de origen desconocido fueron comparadas con tres muestras identificadas. Gracias a un dispositivo análogo al de la figura 2A, se obtiene la figura de difracción de una página. El reparto de intensidad de esta figura se registra localmente por medio de detectores CCD. Un tratamiento estadístico (una matriz de correlación) de los valores numéricos así obtenidos permite definir los dos parámetros más convenientes (llamados simplemente KL_1 y KL_2) para representar estos datos. Los puntos asociados a las páginas analizadas se reparten entre estas coordenadas. Este análisis (E) revela que las páginas desconocidas (0) proceden todas de una misma mano, mano que difiere de todas las demás conocidas. La nube de puntos es tan concentrada y homogénea como las que proceden de los dos secretarios identificados (2 y 3). La dispersión de los puntos asociados al primer secretario de Heine (1) se explica porque este último utilizaba unas veces el alfabeto latino y otras el alfabeto gótico.





Gracias al análisis automático de la escritura, es posible reconocer las firmas falsas.

1 ¿ES LA GRAFOLOGÍA UNA CIENCIA?

En primer lugar: ¿qué es la grafología? En un sentido amplio, el de su etimología, la palabra puede aplicarse a todos los análisis de rasgos gráficos. Sin embargo, actualmente su sentido ha quedado limitado al «estudio del carácter a través de la escritura», según la fórmula de Ludwig Klages. Definida así, la grafología constituye hoy un hecho social. Interesa a personas eminentes y moviliza a multitud de consultantes que buscan revelaciones sobre una personalidad y un destino. Influye en el mercado de trabajo y son muchos los organismos científicos que, al igual que infinidad de empresas, recurren a la grafología para la contratación de sus altos empleados. Además, desde hace algún tiempo, cuenta ya con una consagración institucional: la Sociedad Francesa de Grafología fue reconocida de utilidad pública en 1971 y en 1978, y el Ministerio de Trabajo clasificó a nivel de «ingeniero» la titulación de grafólogo consultor. Solamente la administración de finanzas, cuyo escepticismo es su segunda naturaleza, sigue ofreciendo a los grafólogos la elección entre el régimen de profesiones liberales y el de (generalmente más favorable) profesiones ocultas.

Esta corriente actual, sin embargo, sigue una trayectoria cuyos conceptos parecen corresponder más a siglos pasados que a la ciencia contemporánea. Téngase en cuenta que la grafología procede de la caracterología tal y como fue desarrollada en el siglo XVIII por el teólogo suizo Karl Lavater con la pretensión de determinar la personalidad psíquica mediante la morfología y los gestos corporales. Por otra parte, fue el propio Lavater quien en su célebre *Physionomique* elaboró un primer sistema de grafología. Fue necesario esperar un siglo para, con los trabajos del abate Michon, disponer de una obra propiamente dicha sobre la materia, y otro medio siglo para que apareciera la síntesis de Crépieux-Jamin, que sigue siendo un texto de referencia.[8]

El enfoque que presentan estas obras (así como publicaciones más recientes) es siempre tripartito: incluye una tipología de las escrituras, una tipología de los caracteres y un sistema de relaciones que permite pasar de la primera a la segunda. En cada uno de estos compartimentos intervienen una serie de fluctuaciones en función de los conceptos predominantes en las distintas épocas. Para la escritura, cada autor organiza su propio sistema de «especies gráficas» (dirección, presión, dimensión, ordenamiento, etc.), pero su número va en aumento: de 7 para Crépieux-Jamin a 21 para Thea Lewinson, que así preconiza la «grafometría psicométrica» (Jacques Salce) en la cual las «especies» son medidas con regla y están afectadas por un coeficiente de intensidad que va de − 3 a + 3.[9] De esta manera se obtienen cifras que pueden ser objeto de todos los tratamientos: análisis factorial, grafos, representación mediante diagramas, etc.

En cuanto a la caracterología, su evolución fue al principio menos espectacular. Las tipologías contrastantes sucesivamente adoptadas (dilatado/contraído de L. Corman, activo/pasivo de H. Saint-Morand, primario/secundario de R. Le Senne) recuerdan todavía la antigua doctrina de los cuatro temperamentos.

Es cierto que pueden ser objeto de diversas combinaciones que permiten afinar el cuadro, pero una considerable distancia separa estas clasificaciones fundamentales del inagotable detalle diagnóstico que la grafología actual ofrece a quienes recurren a ella: responde a preguntas de la industria («ingeniero muy motivado por los imperativos de producción, hombre eminentemente práctico») y de la iglesia («sacerdote que trata de hacer perder la fe a sus alumnos») pasando por la imprevisible variedad de las consultas personales. ¿Cómo es posible obtener todas estas conclusiones a partir de unos rasgos?

Por «un poder del instinto para deducir el carácter de un individuo de la impresión producida por su escritura», responde el abate Michon, al que hacen coro todos los autores clásicos. «Se intenta revivir el movimiento de quien la ha trazado», dirá de la escritura J. Crépieux-Jamin. Hay en estas respuestas ciertas dosis de evidencia: la observación de un grafismo, que refleja a la vez unas características culturales y unos rasgos individuales, puede inducir una impresión intuitiva de la misma manera que lo hace la observación de un rostro o de un comportamiento gestual. La experiencia corriente demuestra que una impresión así no está necesariamente desprovista de significado y que la intuición que ha permitido percibirla puede ser desarrollada con la debida preparación. ¿Pero puede descubrir una trayectoria científica? Los concep-

len a un componente óptico más complejo y requieren un cálculo más elaborado que, sin embargo, sigue estando a nuestro alcance.

El montaje que se presenta en la figura 2 lo ilustra con un ejemplo sencillo, tomado de los trabajos sobre la modelización de la escritura realizados[4] en el laboratorio de óptica de Besançon a partir de 1973: se trata de la transformación de la inclinación de una escritura. El sistema de imaginería está formado por dos lentes y un holograma que funciona como una memoria; compara la inclinación de los trazos con la de un eje de referencia y la modifica en un ángulo Θ. Así, una característica de la escritura, su inclinación sobre la línea, se reconstruye mediante un sistema óptico equivalente a un inscriptor. Identificar este sistema es determinar la modificación que aporta al trazado de entrada para producir el trazado de salida. Esto presupone el conocimiento del modelo de entrada. Se trata, principalmente, de comparar manos distintas; es necesario asegurar que se refieren a un mismo modelo colectivo –es decir, en la práctica a un mismo alfabeto, aunque esta restricción puede suprimirse bajo ciertas condiciones– y que proceden de una misma distribución estadística –es decir, en la práctica de una misma lengua–: (Es sabido que, de una lengua a otra, la distribución de las letras varía de frecuencia: en el orden e, s, n, i, a, n para el francés; e, t, a, o, n para el inglés; e, n, i, s, t para el alemán; para que esta distribución quede estabilizada se necesitan unas quinces líneas.)

Si se respetan estas limitaciones, es posible abordar los problemas clásicos en el estudio de los manuscritos. ¿Es el conjunto coherente (son todas las partes obra de una misma mano)? ¿Son la mano o las manos idénticas a las de un escritor conocido? El tratamiento óptico de los rasgos constituye un instrumento que permite enfrentarse a cuestiones de clasificación y de identificación que determinan el progreso de la investigación en muchos campos.

Un poema a cuatro manos

Una operación de este tipo se ha realizado ya trabajando con un gran fondo de la Biblioteca Nacional, el de los papeles de Heinrich Heine, para obtener una clasificación de las diferentes manos que en él aparecen. En el ejemplo aquí presentado, diez páginas de origen desconocido se han comparado con muestras identificadas (cada una también de diez páginas), que proceden de tres secretarios del poeta. El método utilizado consiste en caracterizar cada página por las propiedades de su espectro, captado y numerizado en un dispositivo optoelectrónico (fig. 3). Estos datos se analizan luego en un ordenador para desglosar las variaciones estadísticas significativas: un modelo matemático apropiado, próximo al análisis factorial, permite hacer aparecer los dos principales factores que describen lo más esencial de estas fluctuaciones. Facilitan los dos ejes de coordenadas entre los cuales se inscriben los puntos que representan cada una de las cuarenta páginas tratadas (fig. 3).

Esta proyección da tres series de resultados. En primer lugar, los puntos que corresponden a las diez páginas no identificadas (0) quedan claramente agrupados; la homogeneidad y la concentración de esta nube son perfectamente comparables a las que proceden de dos manos identificadas (2 y 3); hay que llegar a la conclusión de la presencia de una sola mano en el conjunto de las páginas de origen desconocido. A continuación, las distintas nubes se separan; el cuerpo desconocido proviene entonces de una mano diferente de la de los tres secretarios y es necesario tomar en consideración cuatro escrituras para conseguir una clasificación adecuada. A esto se añade un resultado imprevisto: los puntos asociados a la mano del primer secretario[1] se hallan parcialmente dispersos. Un control del grafismo muestra que este escrito mezcla en su escritura dos alfabetos distintos (latino y gótico); por tanto, la conveniencia de las limitaciones metodológicas tiene una confirmación *a contrario*. Las mismas limitaciones prohíben la aplicación de la metodología aquí expuesta a muestras demasiado pequeñas para alcanzar una estabilidad lingüísti-

(4) J. Duvernoy, *Optics communications*, 7, n.º 2, 1973.
(5) K. Steinke, «Automatische Schreibererkennung mit Textunabhängigen Merkmalen», *Angewandte Szenenanalyse* (DAGM Symposium), Berlin, 1979.
(6) J. Duvernoy, D. Charraut, *Pattern recognition*, 12, 1980.

tos principales que vinculan la escritura proceden de la analogía y del símbolo. La zona inferior del trazo se relaciona con la corporalidad (el inconsciente, la sexualidad, etc.), mientras que la zona superior pertenece a la espiritualidad (inteligencia, super-ego) y la zona medida a la personalidad (el yo). Y más aún: el borde del rasgo indica un espíritu abierto al mundo si es dentado, y un carácter cerrado si es liso. En resumen: todo puede ser un signo y, a su vez, las metáforas del psicoanálisis acuden también para alimentar la red de las posibles interpretaciones. Así, una firma arborescente revela un gran trabajador; una rúbrica en forma de vela al viento descubre al embaucador.

En definitiva, la grafología yuxtapone unas técnicas modernas (para el tratamiento y la presentación de las cifras), procedimientos heredados del siglo pasado (para los métodos y técnicas de observación) y conceptos que proceden de la tradición medieval (para la interpretación). Parte de un objeto observable, cuyo modelo científico está por construir –la escritura– para llegar a otro desprovisto de definición unívoca –el carácter– y lo hace mediante una relación exterior a todo control experimental. Por todo ello, pertenece al vasto campo de las prácticas paracientíficas (o pseudocientíficas) que se nutren, en proporciones muy variables, de una legítima curiosidad por un estudio cuya investigación científica no ha terminado, de una credulidad persistente en el cuerpo social y de unas motivaciones materiales que encuentran con qué medrar.

ca, o a otras demasiado fluctuantes para ser descritas por dos factores únicamente. En casos así, hay que poner en práctica otro procedimiento.

La escritura sintética

Las deformaciones que caracterizan una escritura pueden calcularse, como veremos, a partir de un solo segmento de su grafismo (una letra del alfabeto, por ejemplo). En este caso, es necesario el uso del ordenador para centralizar y clasificar las informaciones elementales adquiridas sobre un gran número de dichos segmentos. Los trabajos de K. Steinke[5] demuestran el interés práctico de este procedimiento. En el laboratorio de óptica de Besançon, nuestro interés era más fundamental: poner a punto un modelo matemático del rasgo. Para ello se programa un ordenador con los principales parámetros de una escritura con el fin de generar rasgos según el grafismo de dicha escritura. Los recursos que esta metodología parece ofrecer a la criminalidad tecnológica –producir falsificaciones por ordenador– han podido estimular la imaginación de algunos periodistas científicos; afortunadamente, esto queda contrarrestado por la aptitud del sistema para detectar los engaños (encuadre 2). El sistema, además, está perfectamente preparado para estudiar las características finas de un rasgo, como se podrá comprobar con un ejemplo concreto.

Se trata de una investigación destinada a caracterizar algunas propiedades del grafismo de Paul Claudel dentro de un conjunto limitado.[6] Se ha centrado en las unidades mínimas del rasgo –las letras–. De un documento se han tomado ciento treinta y dos muestras de la letra «a» para su análisis. Si consideramos la primera de la serie como modelo inicial, desempeñará el papel de la entrada a un sistema (equivalente al inscriptor) cuya salida está representada por cada una de las muestras siguientes. De este modo es posible calcular la transformación geométrica que, desplazando cada punto del modelo inicial, le hace coincidir con su homólogo en una de las muestras siguientes.

Esta transformación se expresa por una función no lineal de las coordenadas, que es posible ajustar para obtener una comparación total entre el modelo y la muestra. En estas condiciones, cada una de las muestras queda perfectamente caracterizada por los valores numéricos de sus parámetros, y basta calcularlos para poder reproducir su grafismo por síntesis numérica.

En el ejemplo que estamos considerando, los parámetros son veinte y, por tanto, el grafismo de Claudel será descrito en un espacio de veinte dimensiones. En este espacio, las ciento treinta y dos muestras dibujan una nube de puntos cuya forma puede estudiarse: se observa que se separa en dos configuraciones distintas. Un examen del rasgo muestra que estos dos grupos corresponden, respectivamente, a las letras aisladas y a las letras ligadas dentro de una palabra. Tal distribución, que al principio no se había tenido en cuenta, confirma el valor heurístico del método, al mismo tiempo que pone de manifiesto una característica específica del rasgo. Permite construir, a partir de un modelo inicial, el grafismo medio representativo de las dos clases de la letra «a» (fig. 4).

Esta construcción viene a demostrar que la dinámica del rasgo se ejerce de manera desigual en el exterior o en el interior de una palabra y, por tanto, abre a la investigación unas perspectivas que sobrepasan el estudio de un solo conjunto. Son bien manifiestas, pues, las posibilidades y los límites de la síntesis de los rasgos, síntesis que permite tratar las estructuras y las fluctuaciones más sutiles, pero que, en cambio, impone una secuencia de operaciones cuya puesta en práctica es más lenta. Para análisis más completos sobre una cantidad de datos, es necesario investigar una asociación de métodos ópticos que garanticen una captación instantánea de la información, y unos modelos matemáticos que permitan efectuar el análisis de una manera selectiva.

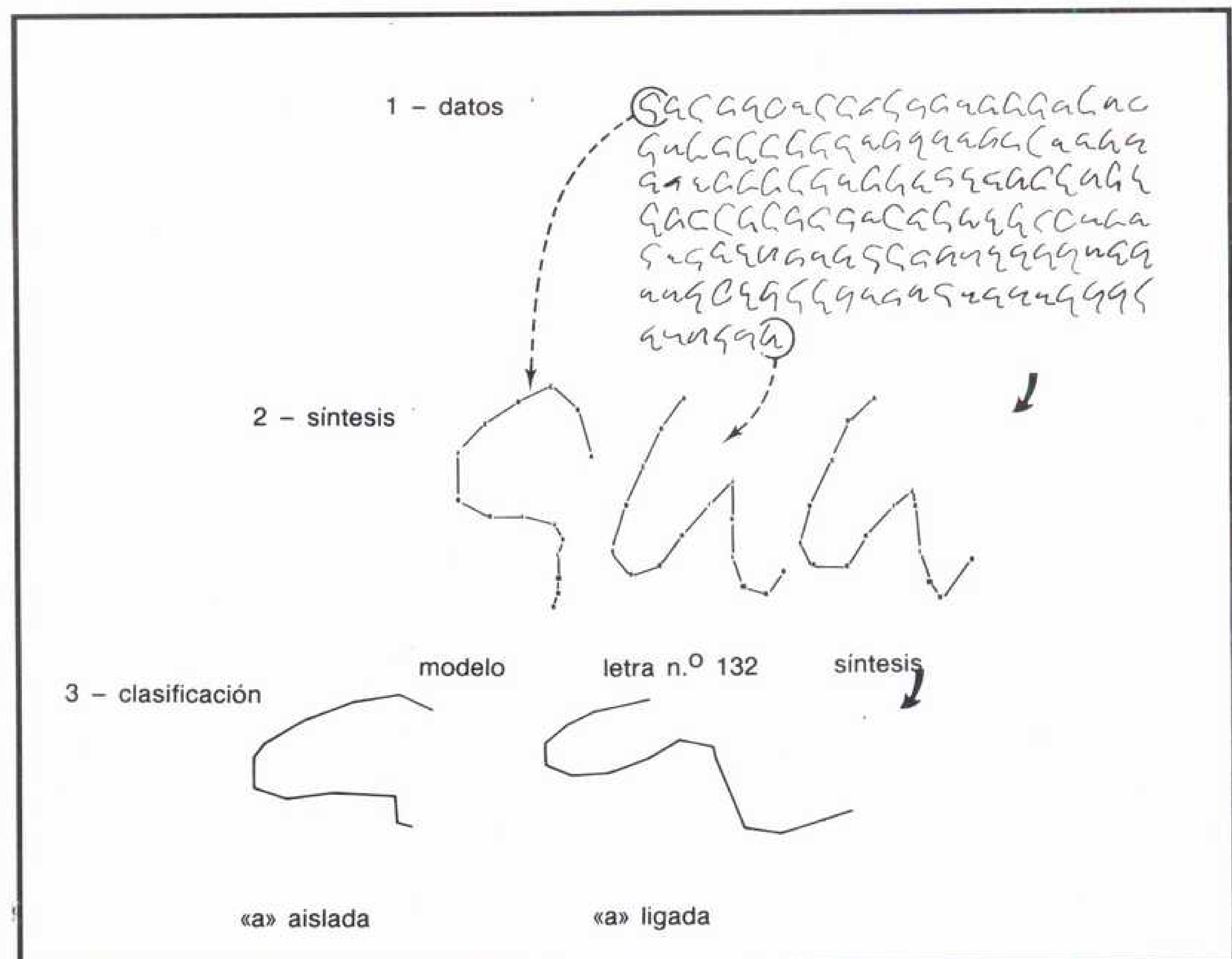
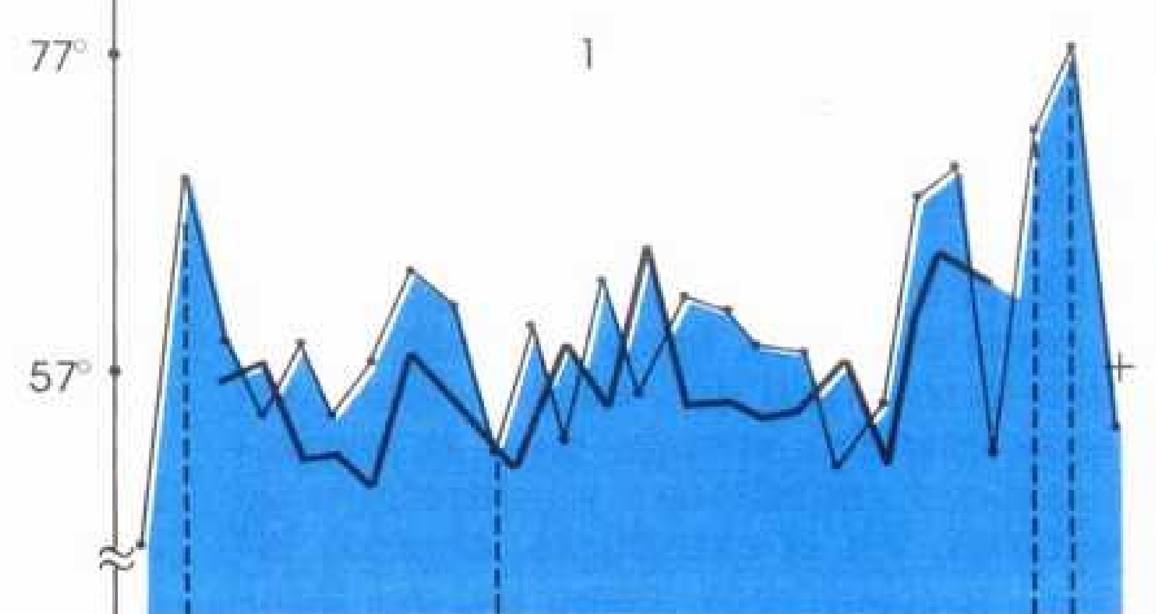
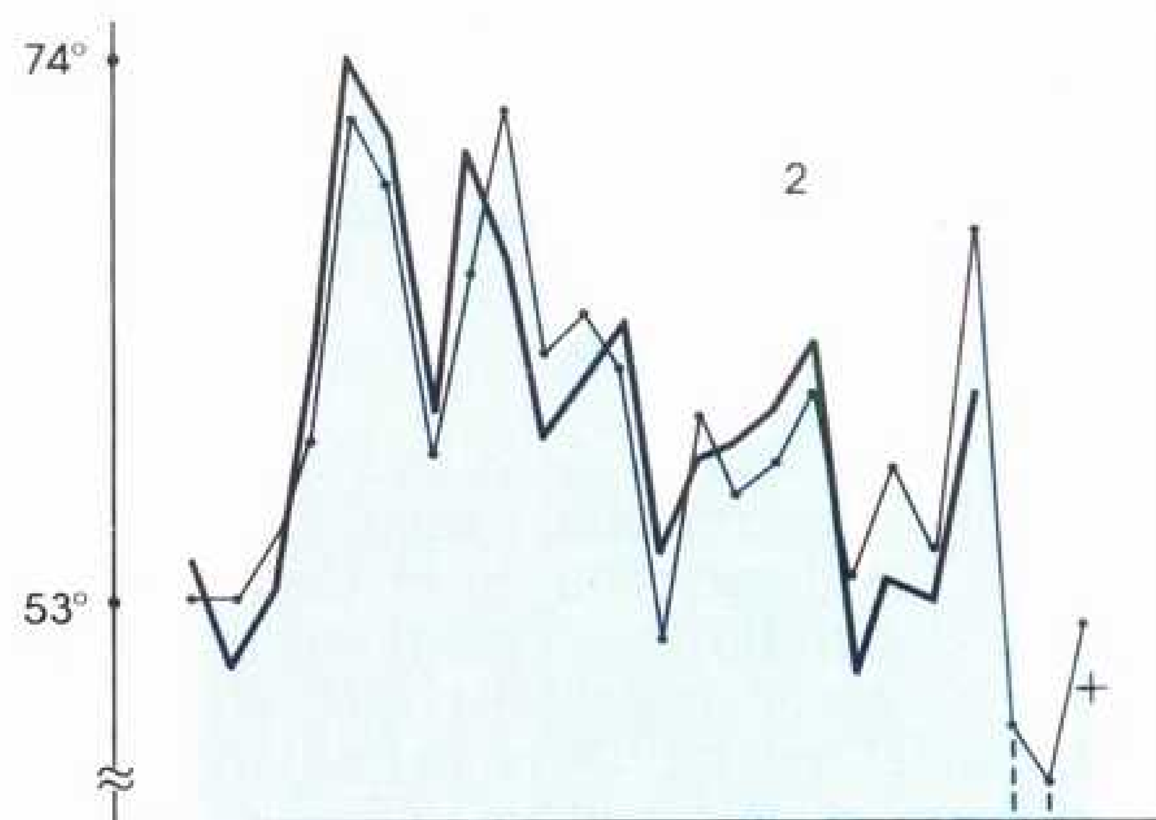


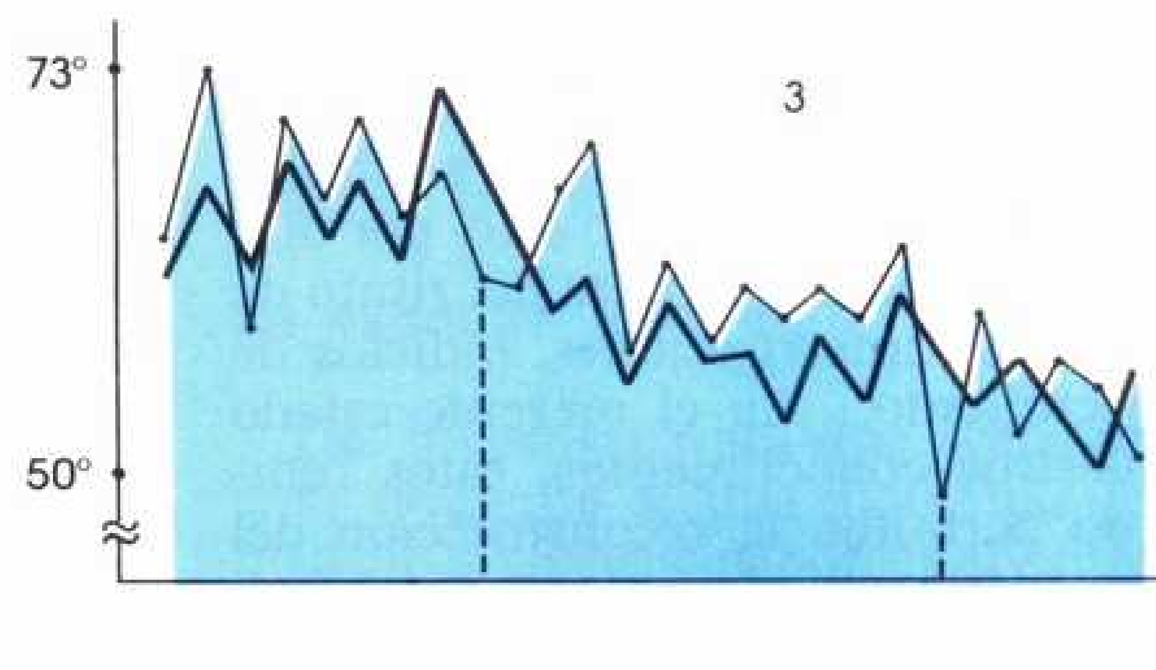
Figura 4. La síntesis de una escritura puede realizarse por métodos puramente numéricos. La geometría del trazado de una escritura se representa con la ayuda de un modelo matemático que permite reproducir automáticamente y calcular los parámetros de sus variaciones. Muy adecuado para el estudio de pequeñas muestras, este método se presta bien a la detección de falsificaciones (firmas) y al estudio de las letras de un trazo. En el caso de Paul Claudel, la investigación se ha llevado a cabo con 132 muestras de la letra a. *A partir de la primera* a *de la serie, se ha calculado la deformación geométrica de cada una de las otras. Luego, a partir de estas medidas, se ha reproducido por síntesis una letra* a. *La comparación de esta letra de síntesis con las muestras hace que, en Claudel, aparezcan dos tipos de* a: *el primero corresponde a la letra aislada; el segundo, a la letra ligada dentro de una palabra.*

El análisis permite descubrir los regímenes y las rupturas de la escritura.

Figura 5. La escritura es también un fenómeno temporal. Cambiar de pluma, detenerse, volver atrás, abandonar un texto y luego reanudarlo: todo esto puede descubrirse con el análisis. El estudio de estas características temporales da información sobre el mecanismo de la escritura, la datación y la composición de un documento. Aquí, diecisiete páginas del Voyage en Italie, de Paul Claudel, han sido analizadas para conocer las etapas de su composición y los ritmos de su producción. Un método óptico/numérico permite descubrir las fluctuaciones de un trazo en una secuencia de varias líneas y predecir con ello los valores en la línea siguiente. Ha habido que recurrir a tres modelos distintos de predicción (m_I, m_{II}, m_{III}) para obtener una correspondencia entre la curva de las predicciones y la de las medidas (el ángulo de inclinación de la escritura figura en la ordenada y la secuencia de las líneas analizadas en la abscisa). Cada modelo corresponde a una página del manuscrito y a un régimen distinto de escritura. Las líneas indeterminadas (aquéllas en que la predicción no se verifica) indican las zonas fronterizas que corresponden, sobre todo, a los límites de una etapa de redacción.







Determinar la evolución temporal de una escritura por análisis óptico/numérico equivale a fechar un manuscrito.

2 LA PERITACIÓN EN ESCRITURA: ¿LAS MÁQUINAS AL TRIBUNAL?

La peritación judicial tiene por objeto detectar las deformaciones que presenta una escritura para imitar otra ajena o disimular la propia; las firmas falsas (falsificaciones) o los mensajes anónimos son ejemplos clásicos de estos dos casos. Estas operaciones imponen a un mecanismo adquirido, el de la escritura individual, una serie de rasgos voluntariamente provocados que imprimen unos determinados efectos en los trazos. Por tanto, su detección se centra en un fenómeno objetivamente observable. Pero, en ausencia de un modelo científico de los mecanismos de la escritura, hay que recurrir a un proceso empírico, lo que hace imposible calcular el nivel de probabilidad de los resultados. Según ha escrito uno de los mejores especialistas franceses en la materia: *«Cada experto se aplica en solitario a resolver los problemas que se plantean, utilizando los recursos de su cultura y de su intuición, generalmente para efectuar una comparación letra a letra»*.[10] Y, a falta de poder completar y confirmar los procesos empíricos con métodos experimentales, siempre hay un margen para la duda. La posición del perito es, pues, intermedia entre la certeza que reclama la justicia y el inevitable riesgo que corre toda peritación. La actualidad judicial se encarga de recordarnos a intervalos regulares los peligros que tal situación puede comportar a los presuntos implicados.

Por esto, el interés de los investigadores se orienta, como es lógico, hacia procedimientos de análisis automático que, en principio, presentan una esencial ventaja para la peritación: el carácter cuantitativo y controlable de sus resultados. En el extranjero, algunos laboratorios especializados, como los del *Bundeskriminalamt* en la República Federal de Alemania, han desarrollado unos métodos numéricos (numerización de rasgos por cámaras de TV de alta resolución) para la identificación de lo escrito.[11] En Francia, el laboratorio de Duffieux, en Besançon, se ha interesado por las ventajas que en este campo presenta la metodología de síntesis de los rasgos, presentada en este artículo dentro del apartado «La escritura sintética». Esta metodología se basa en los modos de fluctuación de un grafismo, que lo caracterizan mejor que su forma y que son los que más escapan a todo intento de deformación voluntaria.

Este procedimiento ha sido ensayado en una documentación de origen judicial, formada por dos lotes de muestras de una misma firma, el primero atribuible al propietario de un talonario de cheques y el segundo de atribución en litigio. Entre los dos lotes, algunas diferencias aparentes ya fueron reveladas por la peritación empírica. La acusación sostenía que estas diferencias habían sido provocadas voluntariamente por el propietario («autofalsificación») con intención de estafa; la defensa, en cambio, sostenía que eran obra de un ladrón que se había apoderado del talonario. En el laboratorio de Duffieux, las variaciones características de cada uno de los dos lotes fueron descritas, en principio, por las magnitudes estadísticas de sus principales parámetros. Los valores medios de éstos dan razón de las constantes del grafismo y, por otra parte, permiten producir una muestra por síntesis (véase la metodología, presentada en este mismo artículo, fig. 5).

Por tanto, es posible medir las diferencias tipo que nos informan sobre la manera en que fluctúan los parámetros de cada muestra alrededor de los tipos medios. En el caso al que nos referimos, el lote identificado (de mano del propietario) presenta unas fluctuaciones importantes que caracterizan el grafismo trazado sin ninguna clase de presión. En cambio, el lote en litigio, presenta un fuerte valor medio y unas diferencias tipo muy pequeñas: se trata de la imitación de un mismo modelo. En este caso particular, el tribunal no pudo disponer de esta información (el experimento se efectuó a una demanda posterior de la defensa) y dictaminó que se trataba de un intento de estafa.

El tiempo de la escritura

Todas las operaciones de la escritura –inscripción, interrupción, supresión, sustitución– se desarrollan en el tiempo, y este desarrollo está determinado por unos procesos cognitivos que se expresan en el escrito. Para delimitar estos procesos y comprender el movimiento de la escritura es especialmente interesante reconstruir su temporalidad, es decir, poner de algún modo en movimiento la pluma de un escritor, desaparecido quizá hace varios siglos. Para ello es necesario analizar lo que subsiste del tiempo en un grafismo que, por otra parte, está inmóvil: señales del ritmo de escritura, de interrupciones, indicios de envejecimiento... En el presente estado de nuestros conocimientos, estos indicios no permiten la reconstrucción del tiempo desaparecido en su totalidad, pero sí una aproximación.

En principio, esta investigación requiere una distinción entre los plazos corto y largo de la escritura, ya que cada uno de ellos se remite a fenómenos distintos. Las modificaciones a corto plazo que afectan al rasgo en el interior de una misma secuencia (constituida, en general, por una o varias páginas) se deben a fluctuaciones de tipo neurofisiológico, cuya exploración todavía no ha finalizado. Las transformaciones a largo plazo que la escritura sufre a lo largo de los años proceden, en cambio, de una evolución de mecanismos adquiridos –los de los movimientos de la escritura– sobre un fondo de envejecimiento biológico. Es cierto que algunas perturbaciones –y especialmente las enfermedades– nos recuerdan que esta oposición no es en modo alguno absoluta. No obstante, conviene tenerla en cuenta en el terreno experimental, para evitar que la información quede empañada por la interferencia de estos dos órdenes de fenómenos.

En este aspecto, un problema clásico es el de reconocimiento de las «campañas de escritura», en el que se trata de identificar y de delimitar las partes del texto que pertenecen a una misma etapa de redacción. Esta información puede presentar interés en la investigación histórica (datación) o literaria (estudios de génesis), así como en sus aplicaciones a la informática textual (estructuración de las secuencias en redacción asistida por ordenador). En el ejemplo aquí presentado, se trata de la condición de un documento dudoso. En esencia, importa saber si el manuscrito conocido con el título de *Voyage en Italie*, de Paul Claudel, fue escrito al día –y, por tanto, constituye un verdadero diario de viaje– o si fue objeto de una redacción continuada, en forma de diario, que lo convertiría en una composición literaria. Estudio en colaboración entre la unidad «Manuscrits et textes claudéliens» (UA 1040 del CNRS) y el laboratorio P.M. Duffieux, esta investigación ha permitido, a la vez, desarrollar nuevas metodologías para el análisis temporal de las escrituras.

El problema planteado puede ser tratado en términos de regularidad o de ruptura del trazo. Aquí, la escala temporal es intermedia entre la palabra y la página, lo que hace que la línea deba considerarse como unidad básica. El tamaño limitado de esta muestra nos impone la obligación de operar sobre datos independientes de la distribución estadística de las letras. En definitiva, es la inclinación del rasgo sobre la línea de escritura lo que se ha escogido, debido a la facilidad que ofrece para la captación óptica. La muestra tratada comprende ciento cincuenta y cuatro líneas, que se expresan por cuatrocientos cincuenta y cuatro valores angulares sucesivos, cuyo conjunto forma una serie temporal. En el análisis, se revela como signo aleatorio (fig. 5), lo que indica un trazo muy fluctuante. En este punto, se trata de saber si las fluctuaciones son todas de un solo tipo o si la muestra las presenta en varios modos distintos, susceptibles de hacer pensar en varias campañas de escritura.

El método aplicado consiste en caracterizar las fluctuaciones en un determinado segmento de escritura para deducir el valor más probable en el segmento inmediatamente siguiente. Esta extrapolación del pasado hacia el futuro permite construir un modelo matemático, llamado de predicción lineal, que evalúa la coherencia del grafismo: si la parte predicha corresponde al valor efectivamente medido, la nueva línea de escritura podrá considerarse homogénea con las que la preceden. En el conjunto estudiado, este resultado sólo ha podido conseguirse (con una precisión del 95 %, véase fig. 5) construyendo tres modelos distintos de predicción. De este modo, el texto se halla fragmentado en una serie de páginas, cada una de las cuales está asociada a uno de los modelos (fig. 5). Los modos de fluctuación del rasgo han permitido, pues, poner de manifiesto unos pasajes en los que el grafismo corresponde a diferentes regímenes de escritura.

(7) A. Grésillon, J.L. Lebrave, C. Viollet, «Considérations sur l'inachèvement dans l'écriture littéraire», *DRLAV, 35-35,* París, 1986.
(8) J. Kaspar Laveter, *Fragments physionomiques pour servir à l'avancement de la connaissance et de l'amour des humains,* 4 vol., 1775-1778, en alemán; J.-H. Michon, *Système pratique de graphologie, l'art de connaître les hommes d'après leur écriture,* 1875; J. Crépieux-Jamin, *«L'ABC de la graphologie»,* 1929.
(9) T. Lewinson y J. Dubin, *Handwriting analysis,* 1942.

Al mismo tiempo, esta investigación ha dado unos resultados que no habían sido inicialmente previstos. Tal es el caso de algunas líneas que no se adaptan a ninguno de los modos predichos. Unas están situadas a principio de página, de párrafo o de nueva toma de la pluma, y esta constatación de una nueva consistencia a las recientes hipótesis formuladas en ligüística sobre el mecanismo de las rupturas en la producción del texto.[7] Otras corresponden a proposiciones exclamativas, pero esta relación está aún por interpretar. Así, los ritmos del rasgo hacen pensar en una relación compleja entre lo que está escrito y la manera de escribirlo: interesante tema para futuras investigaciones.

Las evoluciones a largo plazo

La hipótesis que hay que verificar primero es la de una relación no aleatoria entre la evolución de un grafismo y su duración. Por tanto, hay que comparar entre sí muestras sucesivas de una misma mano, distribuidas convenientemente en el tiempo. Esta investigación se ha realizado sobre un período de treinta y cinco años, representado por los escritos de Heinrich Heine entre 1820 y 1855. Tres series de muestras –manuscritos en limpio, correspondencia, borradores– han sido empleados en esta ocasión, para evitar toda interferencia entre la naturaleza de los documentos y la evolución de la escritura.

Como se ha visto ya a propósito de la «página y su doble», los parámetros estadísticos de un rasgo pueden extraerse de su espectro y caracterizarse por un reducido número de factores. Estos factores toman valores especiales en cada página que, de este modo, tiene asignada una representación numérica. Entonces es posible calcular entre estos valores una diferencia matemática que mida la «distancia» entre las diversas muestras. Se habrá establecido una evolución a largo plazo si las distancias entre las páginas que se suceden en el tiempo no están distribuidas de manera aleatoria; aparece entonces una relación entre el tiempo y la evolución del grafismo. Esta evolución puede representarse por un ábaco que, en el caso de Heinrich Heine, toma una forma análoga para cada una de las tres series. Por consiguiente, hay que llegar a la conclusión de una evolución temporal única de la escritura, resultado tanto más significativo cuanto que será corroborado por el análisis de otros conjuntos.

Por otra parte, este resultado ofrece nuevas perspectivas en las aplicaciones. Cuando no se conoce la fecha de una muestra, es posible calcular la distancia entre sus características numéricas y las de otras muestras ya fechadas; el ábaco la convierte en una distancia temporal y, por consiguiente, funciona como un instrumento de datación, al tiempo que

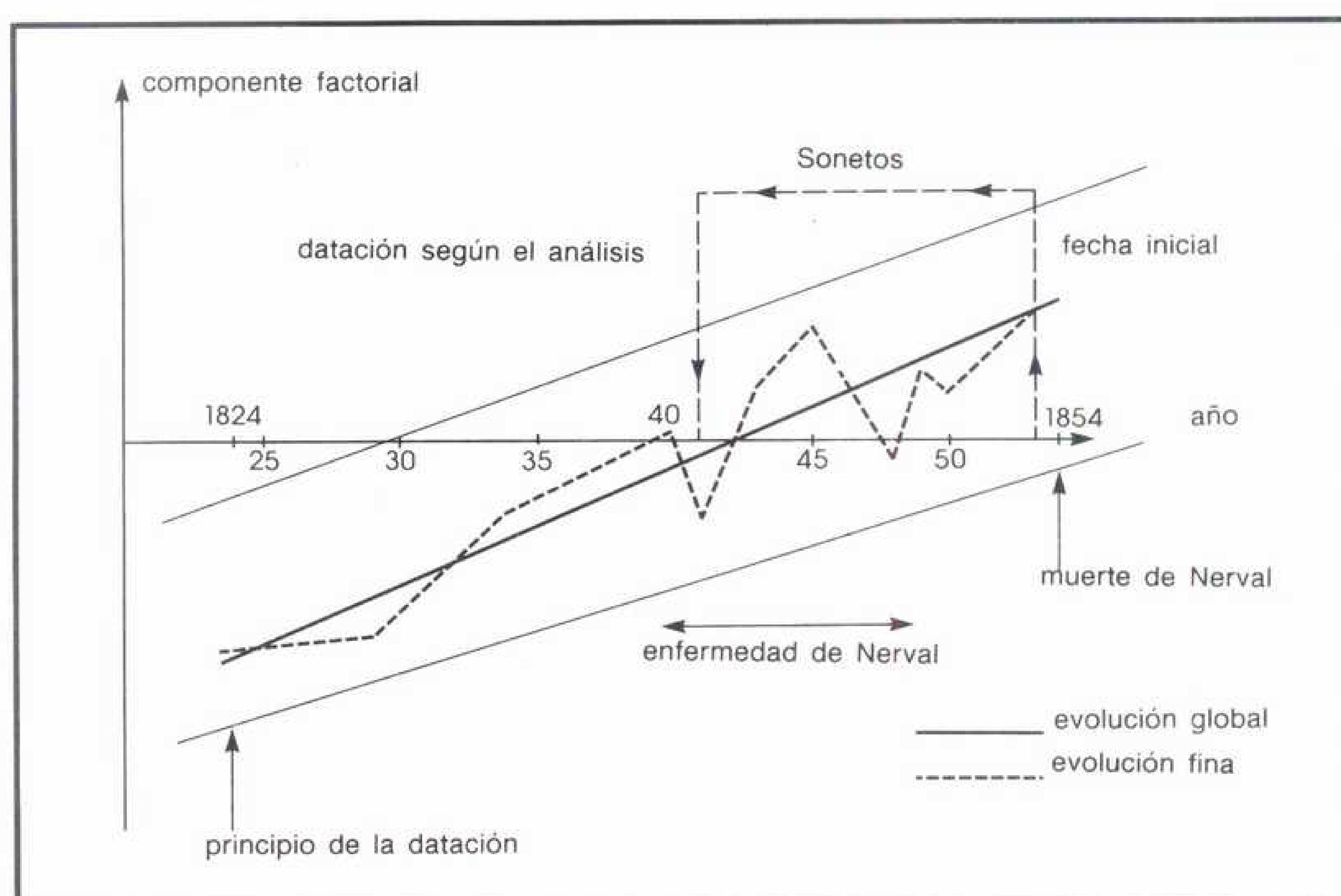


Figura 6. Las modificaciones que sufre una escritura en el transcurso del tiempo ofrecen una posibilidad de datación de los manuscritos. La evolución de la escritura de Gérard de Nerval ha sido analizada a partir de manuscritos realizados entre 1824 y 1854. En este diagrama figura en línea continua la evolución general de la escritura de Nerval durante treinta años y, en línea discontinua, la representación de todas las fluctuaciones que caracterizan dicha escritura. Ahora bien, Nerval sufrió en varias ocasiones crisis nerviosas: las fluctuaciones del grafismo hacen aparecer unos «picos» que indican estas crisis, especialmente la de 1845. La comparación del manuscrito de una serie de poemas titulados Autres chimères *con una muestra de textos escritos hacia 1844 ha permitido, finalmente, fechar estos poemas en 1841 (y no en 1853 como pensaba la crítica), en un momento en que Nerval sufría precisamente una crisis nerviosa. El análisis de la escritura se convierte, pues, en instrumento de una investigación «neurohistórica» en la que convergen muchas disciplinas.*

su misma configuración puede ser fuente de informaciones. Es el caso, por ejemplo, del análisis temporal de los manuscritos de Gérard de Nerval (1808-1855), realizado por el Laboratorio de óptica de Besançon y el Centro de investigaciones Nerval-Baudelaire, y cuyos resultados se presentaron en 1985 en el coloquio *Espaces de la lecture* en el Centro Pompidou.

El estudio de estos manuscritos ofrecen dificultades bien conocidas de los especialistas, debido a su dispersión y a su carácter heterogéneo. Varios centenares de páginas fueron sometidas a un análisis óptico/numérico y, a partir de las medidas tomadas en su espectro, ha podido obtenerse un parámetro directamente ligado al tiempo para cada una de aquellas páginas. Como ya hemos visto, esto permite medir una distancia entre las muestras, distancia que puede representarse mediante un diagrama (fig. 6). El trazado central representa la evolución media de la escritura durante un período de treinta años, mientras que el trazado discontinuo describe las fluctuaciones finas del grafismo durante esta época. Este diagrama da acceso a una información inédita. El eje central ha servido de ábaco de datación para el manuscrito de un conjunto de poemas que el público conoce bajo el nombre (apócrifo) de *Autres chimères* y que, hasta ahora, la crítica había fechado en 1853. En cambio, el análisis ha puesto de manifiesto la proximidad de este trazado con las muestras fechadas en 1844, con un margen de aproximación de tres años. El retorno a los datos históricos ha permitido aceptar definitivamente la fecha de 1841, y este desplazamiento de fecha modifica de manera significativa nuestro saber histórico y nuestra inteligibilidad de la obra. Al mismo tiempo, el examen de las fluctuaciones finas hace aparecer una serie de picos, los más destacados de los cuales corresponden a los años 1841, 1845 y 1858, fechas que hay que relacionar con las crisis nerviosas que sufrió Nerval, y algunas de las cuales conocemos debido a su internamiento psiquiátrico. Otras, en cambio, eran desconocidas o controvertidas, por ejemplo, la crisis de 1854, *«un dato capital que permitirá estructurar toda la obra de Nerval sobre la coincidencia de la óptica y de la historia»* (J. Guillaume). El análisis de los rasgos opera aquí como una máquina de viajar en el tiempo, y es el único medio de tener acceso a las perturbaciones que afectaron a un espíritu y a una mano desaparecidos hace ya mucho.

La escritura del futuro

Las investigaciones que acabamos de citar surgieron de una inquietud de tipo instrumental: la colaboración entre dos departamentos del CNRS, el de Ciencias para el ingeniero y el de Ciencias del hombre y de la sociedad, tenía por objeto hacerse con unos nuevos instrumentos, más conformes con las exigen-

(10) M.J. Berrichon-Sedeyn, experto del Tribunal de Apelación de París: «Fil ou film de l'écriture», en *Espaces de lecture,* París, 1986. (en prensa; cita hecha con la amable autorización del autor).

(11) Un interesante informe técnico, *Projekt Schreibererkennung,* elaborado en 1980 por un matemático de este laboratorio, K. Steinke, 1980.

cias de la investigación contemporánea. Este propósito no se ha abandonado y el trabajo va prosiguiendo; su finalidad primordial es obtener unos instrumentos flexibles, de manejo más rápido y sencillo. No se trata, sin embargo, de imitar el ojo y el cerebro, como a veces ha hecho creer la asociación de la óptica y de la informática. Evidentemente, sería difícil superar actualmente las prestaciones que proporcionan los órganos humanos en las funciones para las cuales están adaptados: el ojo capta y separa elementos de un trazo, el cerebro los compara y los interpreta con una potencia muy superior a la de cualquier autómata de tamaño razonable. En cambio, este último permite acceder a una zona de informaciones que escapa al observador humano y que se refiere a las propiedades estadísticas de un trazado, los valores numéricos de sus parámetros y el modelo matemático de sus fluctuaciones. De esta manera han podido descubrirse propiedades estructurales de la escritura: el intervalo de estacionalidad (las características medidas se hacen estacionales cuando el tamaño de la muestra es superior a unas diez líneas), la ergodicidad (reciprocidad entre las medidas espaciales y las medidas temporales de la escritura), la presencia simultánea de puntos estables y de puntos fluctuantes en todo trazado, es decir, una serie de datos que son los primeros elementos necesarios para la construcción de un «esqueleto» temporal y espacial del fenómeno escritura.

Iniciada como una investigación de tipo analítico, el análisis óptico/numérico de los trazos ha dado unos resultados de carácter fundamental. Este retorno imprevisto de lo posterior a lo anterior ha abierto unas puertas que parecían muy bien cerradas, especialmente entre este canal de transmisión que es la escritura y las «cajas negras» que controlan la emisión y la recepción del mensaje. Al propio tiempo, ha tenido unas consecuencias totalmente inesperadas. Mientras que el campo en el que se pensaba operar era el de las ciencias humanas, se ha visto que otras disciplinas (jurídicas y económicas, así como la informática textual) han aportado también su intervención. Mientras que la escritura se interrogaba solamente por su poder de revelarnos el pasado, sus efectos se han manifestado en el presente y ha abierto nuevas perspectivas para el futuro.

La escritura electrónica hace su aparición en la producción y en la transmisión de mensajes y, a pesar de que solamente está en sus comienzos, indica que la galaxia Gutenberg no se halla ni mucho menos en vías de extinción. Precisamente con el desarrollo de las «salidas gráficas» la informática ha adquirido una nueva dimensión y la tecnología de los «trazadores» figura hoy entre sus especialidades punta, tanto por la rapidez de su expansión como por la diversificación de sus tecnologías: trazadores con pluma, electrostáticos, etc. La óptica y la electrónica se conjugan, pues, para abrir nuevas perspectivas al escrito. Invención milenaria y tecnología del futuro, expresión del individuo y estructura de lo social, actividad del cerebro, de la mirada y de la mano, la escritura no ha acabado aún de incitar la curiosidad de los investigadores.■

Para más información:

- J. Glénisson, L. Hay, *Les méthodes de laboratoire dans l'étude des manuscrits,* Coloquio internacional del CNRS, París, 1974.
- J. Duvernoy, «Application of autoregressive models to the study of the temporal structure of a handwritten text», en *Pattern recognition, 11,* n.° 3, 1980.
- C.H. Frederiksen, J.F. Dominic (eds.), *Writing: process, development and communication,* Hillsdale, 1981.
- C. Sirat, *L'examen des écritures: l'oeil et la machine,* París, 1981.
- M. Nystrand (ed.), *Process and structure of written discours,* Nueva York, Londres, etc., 1982.
- K.B. Guenther, H. Guenther (eds.), *Schreiben, Schriftlichkeit,* Tubinga, 1983.

INFORMACIONES y noticias

El cólera de lomo de camello

El vibrión colérico, agente responsable del cólera, va siguiendo al hombre en sus desplazamientos. Originario de India, se acantonó durante mucho tiempo en esta región antes de expandirse por el mundo en siete grandes epidemias mortales (o pandemias). En 1817, sale del delta del Ganges con las tropas inglesas que, procedente de las Indias, iban a la conquista de los emiratos árabes, y se desplaza al ritmo de los caminantes o de los caballeros durante las dos primeras grandes pandemias. Durante la tercera pandemia, utiliza los ferrocarriles y los barcos de vapor para invadir el Antiguo y el Nuevo Mundo: es la pandemia de la máquina de vapor. En la cuarta pandemia, sigue el Canal de Suez para llegar a los puertos mediterráneos. Las pandemias quinta y sexta quedaron limitadas por los descubrimientos de Pasteur y Koch, que permitieron disponer de los primeros elementos de una vacuna. Más tarde, el desarrollo y la posterior intensificación de los transportes aéreos originaron la séptima pandemia en 1975: fue la pandemia del queroseno.

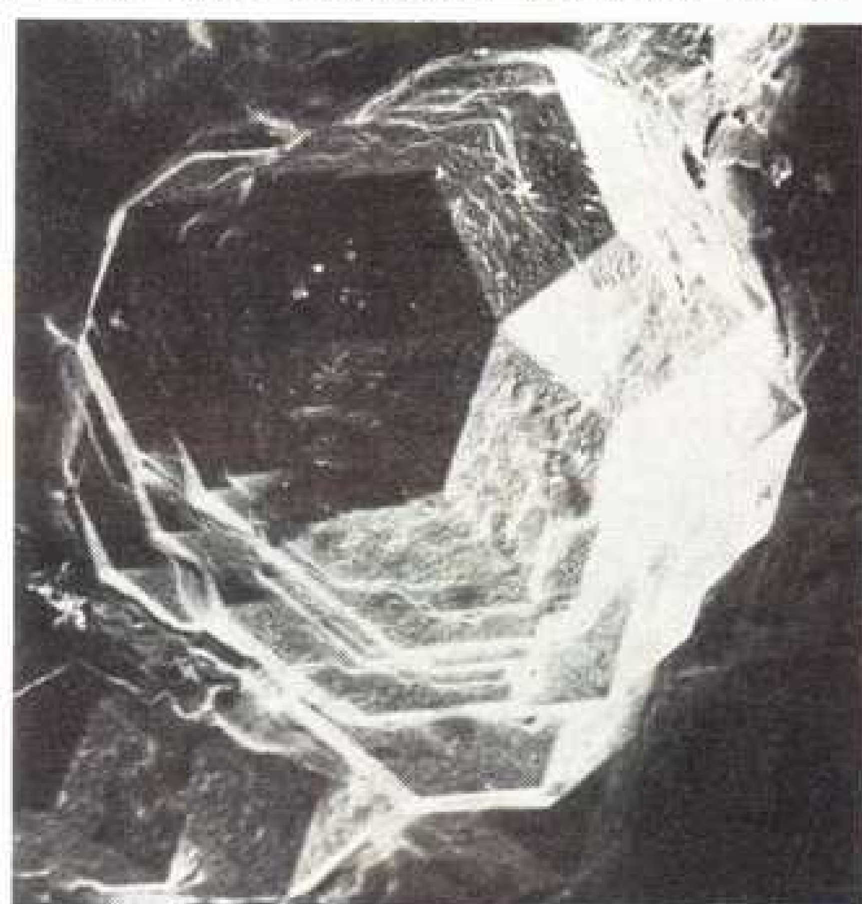
Persistía una incógnita importante: ¿cómo viaja el vibrión a través, principalmente, de la inmensidad de los desiertos africanos? Las aves migratorias no parecían jugar ningún papel en la difusión del cólera; pero quedaban los camellos, los grandes viajeros del desierto. Ahora bien, los camellos tienen una enorme capacidad para absorber enormes cantidades de agua que conservan durante varios días, y el agua es un excelente medio para los agentes del cólera. Para saber si el animal es un potencial vector de diseminación del cólera, un equipo del Instituto Pasteur inoculó por vía oral *per os* el vibrión a unos camellos que –hay que puntualizarlo– son insensibles a él (A. Dodin *et al., C.R. Acad. Sc., 303,* 557, 1986). Los investigadores comprobaron entonces que los animales pueden diseminar los gérmenes durante veinticinco días al menos, duración muy superior a la de un desplazamiento entre dos oasis. Esta experiencia se completó con el descubrimiento de vibriones en el estiércol de camellos que llegaban del desierto después de una larga marcha.

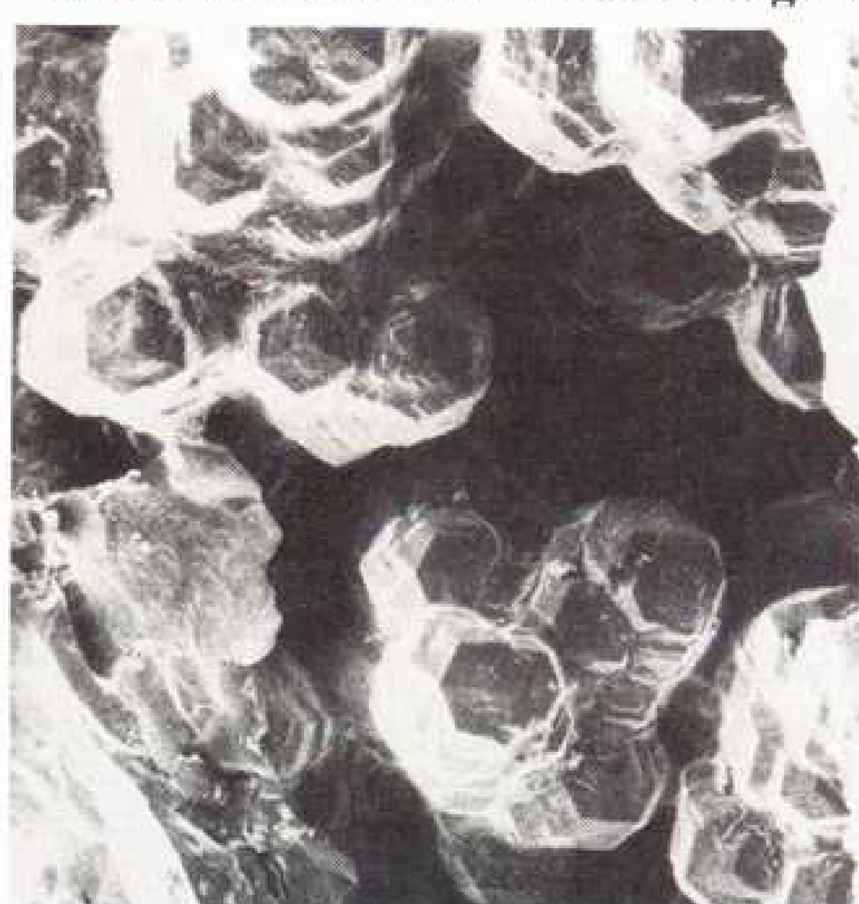
Quedaba, pues, bien establecida la prueba de que el camello puede ser vehículo del agente del cólera. Por tanto, existe un riesgo de que las poblaciones de los oasis vean aparecer epidemias de diarreas que se desplazan con las caravanas, y cuyos portadores son los camellos. Como no se puede obligar a éstos a defecar en un lugar preciso, lo razonable sería proporcionarles agua potable, o al menos esterilizada con lejía, para eliminar los riesgos que provoca este «buque del desierto.»

El primer quasi-cristal apreciable a simple vista

Una gran novedad se ha presentado en el centro de investigación Péchiney de Voreppe, Isère, donde un equipo ha conseguido elaborar «mono-quasi-cristales» macizos, es decir, una primera muestra de quasi-cristales que son, a la vez, puros y de un tamaño suficiente para ser apreciados a simple vista. Estos mono-quasi-cristales tienen la forma de poliedros en perfectas facetas y en treinta rombos idénticos (véanse fotografías). Su tamaño es del orden del milímetro, y en los ensayos más recientes se ha sobrepasado ya el centímetro. Este resultado es fruto de la colaboración entre investigadores de Péchiney (B. Dubost, J.M. Lang, M. Tanaka y P. Sainfort) y M. Audier, investigador grenoblés del CNRS que trabaja en Voreppe. Obtenido en julio de 1986, se anunció en una conferencia de prensa y se publicó en noviembre último (B. Dubost *et al., Nature, 324,* 48, 1986). Se ha demostrado de manera tangible que, lejos de ser una simple curiosidad de laboratorio, los quasi-cristales representan perfectamente un estado estable de la materia.

Son realmente unos objetos que desafían una de las leyes mejor establecidas de la cristalografía: la disposición de sus átomos presenta una simetría denominada de orden cinco. Ahora bien, esta simetría es incompatible con la existencia de una red cristalina tradicional, es decir, estrictamente periódica. D. Gratias, uno de los cuatro investigadores que, en 1984, puso de manifiesto esta simetría prohibida en una aleación aparentemente cristalina de aluminio y manganeso. Pero todos los resultados se han obtenido hasta ahora a partir de quasi-cristales que existen en forma de nódulos dentríticos de algunos micrómetros, inmersos en una matriz metálica. Era, pues, difícil determinar su estructura y, sobre todo sus principales propiedades físicas (elasticidad, conductividad, calor específico, etc.). Gracias a los resultados obtenidos en Voreppe (con una aleación de aluminio, cobre y manganeso) y, algunos meses más tarde, en los laboratorios Bell (Estados Unidos), esta exploración podrá llegar a buen término, aunque con todas las sorpresas que pueden esperarse de esta nueva clase de estados de la materia condensada. (Fotos Péchiney.)





Una Tierra joven y lisa

El relieve de la Tierra hace mil a dos mil quinientos millones de años pudo ser semejante al que actualmente presenta Venus, cuya superficie aparece muy nivelada, con sólo dos formaciones parecidas, por sus dimensiones, a los continentes terrestres y que ocupan casi el 10 % de la superficie. Esta comparación con el planeta Venus la ha hecho E.M. Moores, de la universidad de California *(Science, 234,* 65, 1986).

El autor de esta hipótesis imagina que la corteza oceánica, que ya se formaba en aquella época a partir del magma que se expandía a una y otra parte de las dorsales oceánicas, era dos o tres veces más gruesa que en la actualidad. De este modo, la diferencia de altura entre los continentes y las regiones oceánicas quedaba disminuida.

El nivel del mar era más alto y la Tierra estaba cubierta de agua en un 90 o 95 % de su superficie. Esta hipótesis explicaría, entre otras cosas, por qué no se han hallado nunca testimonios de la corteza oceánica y del manto terrestre en las masas continentales actuales.

BREVE...

¿Puede el virus de la viruela persistir y seguir siendo contagioso varios siglos después de la muerte de sus víctimas? Dos médicos de la universidad de Pisa (Italia) acaban de aislar este virus en la momia de un joven napolitano del siglo XVI *(Lancet, 8507,* 625, 1986).

Aunque sin poder determinar la actividad biológica del virus, afirman que la estructura antigénica de las partículas virales está bien conservada y anuncian que el virus será puesto en cultivo.

Chispas producidas por nubes anormales

El rayo es debido a una descarga eléctrica de gran potencia entre la Tierra y la base de una nube de tormenta como es un cúmulo. Gracias a unos sondeos aerotransportados, ha sido establecido que tales nubes son dipolos eléctricos con un exceso de cargas negativas en su base y de cargas positivas en la parte superior. Pero el origen de este dipolo está aun mal conocido. Una de las hipótesis consideradas es la presencia de un pequeño número de cargas eléctricas naturales en el aire a partir del cual la nube se forma.

Para verificar esta hipótesis, unos investigadores del laboratorio Langmuir de Nuevo México y de la universidad del Estado de Nueva York en Albany (Estados Unidos) han realizado un experimento en los montes Magdalena de Nuevo México *(Science, 233,* 1413, 1986). En esta región, la probabilidad de formación de una nube de tormenta es una de las más elevadas de los Estados Unidos y además los vientos son suficientemente débiles para que la nube se descargue a unos pocos kilómetros solamente de su lugar de formación.

Entre dos cumbres, distantes en dos kilómetros, los investigadores instalaron un hilo eléctrico llevado a una tensión negativa de 120 kV. Este hilo emite unas cargas eléctricas negativas que son capturadas por la nube en formación. El resultado es una nube que tiene una polarización invertida y su base contiene un exceso de cargas positivas. A pesar de esta inversión de las cargas, tales nubes producen tormentas con rayo como las nubes normales. Este experimento ha demostrado por tanto que la inyección artificial de una cantidad muy pequeña de cargas negativas determina las características eléctricas de una nube.

Se puede pues llegar a la conclusión de que la polarización de las nubes normales sería debida a unos iones positivos presentes en el aire durante su formación.

Querella sobre el SIDA: ventaja de los franceses

Desde la primavera pasada el Insituto Pasteur parece estar en buena posición para obtener en Estados Unidos su patente sobre el test de detección del SIDA. Hay que recordar que el equipo de L. Montagnier había identificado por primera vez el virus del SIDA a principios de 1983, de manera que el Instituto Pasteur había podido presentar una demanda de patente para el test de detección de esta enfermedad, desde setiembre de 1983 para Europa y en diciembre de 1983 para Estados Unidos. El National Institutes of Health (NIH), por su parte, había presentado una petición de patente para un test de detección en abril de 1984 apoyándose en el estudio del equipo de R. Gallo. El despacho de patentes americanas otorgaba la patente del NIH en mayo de 1985 ignorando la petición del Instituto Pasteur. Por esta razón, este último, sintiéndose herido, decidió a finales de 1985 entablar una acción judicial contra el ministerio de Salud americano (autoridad responsable del NIH). El pasado 29 de abril, el despacho de patentes americanas anunciaba «abierto un procedimiento de interferencia» sobre los tests de detección del SIDA y declaraba al Instituto Pasteur «titular prioritario», lo cual significa que la patente sería otorgada al Instituto Pasteur antes que al NIH salvo en el caso de que éste aportara las pruebas de que los descubrimientos del equipo de R. Gallo eran anteriores a los de L. Montagnier. Pero, como señala R. Dedonder, director del Instituto Pasteur, «es de notoriedad pública que el equipo de Luc Montagnier ha sido el primero en identificar el virus del SIDA». En su opinión, las declaraciones recientes de la Oficina de patentes americanas significan que la administración americana es también consciente de ello. En todo caso, sobre esta nueva base, el procedimiento puede durar todavía dos años.

Poco tiempo después de este acontecimiento, el 2 de mayo exactamente, un funcionario del ministerio de Salud americano informaba al Instituto Pasteur de que las negociaciones destinadas a evitar un proceso y a solucionar el litigio amistosamente entre las diversas partes eran interrumpidas. Después de la noticia emitida por la Oficina de patentes, el ministerio de la Salud americano había en efecto propuesto al instituto Pasteur solucionar su desacuerdo con la creación de una fundación internacional de investigación sobre el retrovirus (comprendido el del SIDA), a donde irían a parar los «royalties» de la patente del test de detección. Pero el Instituto Pasteur ha declinado esta oferta alegando que no veía por qué los «royalties» irían a un tercero y que existían contratos financieros y jurídicos con su filial «Diagnostics-Pasteur» y su asociado «Genetic Systems», encargados de comercializar el test. Finalmente, por razones éticas (reconocimiento del trabajo de los investigadores franceses), el Instituto Pasteur espera que le sea otorgada la patente. Está sin embargo de acuerdo en compartir los «royalties» con el NIH y hacer reconocer las contribuciones de cada uno para que se establezca una colaboración fructífera entre los equipos.

LAS ENFERMEDADES PROFESIONALES... DEL NEOLÍTICO

Las poblaciones neolíticas también conocían la dolorosa experiencia de las inflamaciones de los tendones provocadas por movimientos intensivos; es lo que corrientemente se denomina «tennis elbow» cuando se trata de una inflamación de codo.

Las zonas de inserción ósea de los tendones de los músculos del brazo o de la pierna presentan entonces unas lesiones, y estas lesiones se han observado que también en esqueletos neolíticos de poblaciones saharianas de Níger y de Mali *(Am. Journ. of Physical Anthropology, 71,* 221, 1986).

O. Dutour, del laboratorio de Geología del Cuaternario (CNRS, Marsella) ha estudiado los restos óseos de veinticinco pescadores de Mali y de dieciséis cazadores-recolectores de Níger para hacer un estudio que relacionara las lesiones observadas con el modo de vida de estas poblaciones.

Eran los cazadores-recolectores los que más afectados estaban por inflamaciones en el brazo y en el pie, inflamaciones provocadas por el uso de arcos y armas de lanzamiento y por largas marchas sobre suelos difíciles. En cambio, sólo dos pescadores presentaban la misma dolencia. En uno de estos casos, las lesiones debían proceder del ejercicio del tiro con arco (algunas poblaciones pescaban con la ayuda de arcos y flechas), y en otro, posiblemente fueron originadas por el lanzamiento de las redes. ¡Un primer ejemplo de enfermedades profesionales prehistóricas!

El verdadero sello de la física cuántica

Detrás de la profusión de luz y de colores que nos envuelve, se halla fundamentalmente un solo tipo de mecánica física: el paso de los átomos de un estado cuántico a otro, de un nivel de energía a otro. Según las respectivas posiciones de estos niveles, el átomo puede emitir o bien absorber un cuanto de luz: un fotón. Estas transiciones son instantáneas y constituyen unos verdaderos «saltos cuánticos», como los llamó N. Bohr a partir de 1913. Desde esta fecha, la interacción de la luz con la materia se ha visto sometida a innumerables desarrollos teóricos y experimentales. Pero hasta tiempos muy recientes, nadie había podido observar el fenómeno cuántico básico sobre el que se han realizado todos estos desarrollos: el salto cuántico de un *solo* átomo. Gracias a los progresos de los últimos años en el terreno de la disminución de velocidad y de las «trampas» para iones, tres grupos han conseguido recientemente llenar esta laguna: en la universidad de Washington, Estados Unidos (W. Nagourney *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, *56*, 2797, 1986), en la universidad de Hamburgo, RFA (T. Sauter *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, *57*, 1696, 1986) y en el National bureau of standard, en Boulder, Colorado (J.C. Bergquist *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 57, 1699, 1986).

Además de su interés intrínseco, la observación de este efecto, de fundamental importancia, abre el camino a la realización de nuevas medidas espectroscópicas de alta resolución y hace posibles nuevos ensayos de mecánica cuántica.

PREMIOS AL PERSONAL INVESTIGADOR DEL DEPARTAMENTO DE CURTIDOS DEL INSTITUTO DE TECNOLOGÍA QUÍMICA Y TEXTIL DE BARCELONA

El Consejo Ejecutivo de la Generalidad de Cataluña ha cencedido la medalla Narcís Monturiol al mérito científico y tecnológico al Prof. de Investigación Dr. Enrique Gratacós. El Dr. Gratacós había recibido recientemente el Premio Fundación FICIA de Investigación por el trabajo «Comportamiento del cuero para suela y empeine frente al agua», así como –en colaboración con los señores Agustín Marsal y Manuel Portavella– el Premio de la Asociación Química Española de la Industria del Cuero 1986 por el trabajo «Experiencias sobre el exceso de temperatura en el secado de piel lanar», compuesto de dos comunicaciones presentadas en el II Congreso Internacional Mediterráneo de Químicos y Técnicos del Cuero y en la II Conferencia Mundial del Merino.

Por otra parte, el Prof. de Investigación Dr. Jaime Cot fue galardonado con el Premio Hispano Química 1986 por su labor investigadora en el campo de los curtidos, premio que asimismo había sido otorgado al Dr. Gratacós en 1985.

EL ELIXIR DE JUVENTUD

Un elixir de larga vida... para los mosquitos: éste es el cóctel cuidadosamente preparado por un equipo norteamericano de la universidad de Louisville, en Kentucky (J. Richie, *Proc. Soc. Exper, biol. Med. 183,* 81, 1986). El secreto de la juventud está en el ácido dihidroguanético, un potente antioxidante que impide la corrosión química de las células. Un poco de ácido en la alimentación y el mosquito pasa de un período vital de 24 días a otro de 35, es decir, un aumento del 50 %.

La elección del mosquito para este experimento no ha sido, evidentemente, hecha al azar, ya que el insecto presenta un metabolismo parecido al de organismos más evolucionados, y su duración de vida es suficientemente corta para multiplicar los experimentos de laboratorio. Indudablemente, es todavía prematuro pensar que el mosquito compartirá en un futuro muy próximo su elixir de juventud con el hombre.

Aunque no ha servido para prevenir la vejez humana, el experimento realizado con el mosquito sí puede ayudar a la comprensión de sus mecanismos.

II Jornadas de Paleontología

Con más de 150 participantes inscritos pertenecientes a la Sociedad Española de Paleontología se han celebrado en el Instituto de Paleontología Miquel Crusafont de Sabadell las II Jornadas de Paleontología.

Pese a que el desarrollo de la ciencia de la vida del pasado (Paleontología) tiene en nuestro país larga tradición que arranca del siglo XVIII, sin embargo el número de especialistas es corto en relación con el de otros países. Sin embargo, a partir de los años 60 y con la creación de Secciones de Geología y de Biología en las Universidades ha crecido muy rápidamente una comunidad científica joven y dinámica. La creación de la Sociedad Española de Paleontología hace un año, y presidida por el Dr. Jaime Truyols Santoja, catedrático de la Universidad de Oviedo, ha impulsado de manera notable el desarrollo de esta ciencia.

Durante tres apretados días de trabajo (27 a 29 de noviembre) se han presentado cuatro ponencias, 40 comunicaciones científicas y 15 «posters». La ponencia inaugural corrió a cargo del prestigioso profesor Ramón Margalef, catedrático de Ecología de la Universidad de Barcelona, que trató el tema «Sucesión y evolución: su proyección biogeográfica».

Estas Jornadas científicas, las segundas que se celebran en nuestro país, han tenido este año un doble aspecto: por un lado se ha querido rendir un homenaje al profesor Miquel Crusafont, que fue Catedrático de Paleontología de la Universidad de Barcelona y fundador del Instituto Científico que lleva su nombre en Sabadell. Crusafont falleció hace muy pocos años y en su tiempo fue el paleontólogo español de mayor proyección internacional y prestigio científico. Por el Instituto de Paleontología que él mismo fundó han pasado en estos últimos 20 años las primeras figuras mundiales de la especialidad (Simpson, von Koeniswald, Lavocat...).

Por otro lado, la comunidad científica de paleontólogos españoles se ha reunido para abordar desde distintos puntos de vista el tema de la «Paleontología y la Biogeografía», la vida del pasado y su dinámica geográfica. Sobre este tema han girado las comunicaciones presentadas y que tocaban grupos de organismos fósiles muy diversos: mamíferos, reptiles, moluscos, plantas, foraminíferos...

Particularmente emotivo fue el acto Homenaje al Dr. Miquel Crusafont, y en el que intervinieron el Director actual del Instituto, Dr. Jorge Agustí, el presidente de la Sociedad Española de Paleontología, Dr. Jaime Truyols, uno de los hijos de Miquel Crusafont y el Diputado de Cultura de la Diputación de Barcelona, así como el Dr. Emiliano de Aguirre, activo colaborador del Instituto. Todos ellos glosaron la personalidad humana y científica del que ha sido maestro de muchas generaciones de paleontólogos de vertebrados.

El acto de homenaje culminó con una visita comentada a las instalaciones del Museo del Instituto de Paleontología que está siendo profundamente remodelado.

Cabe destacar que durante estas Jornadas la Asamblea Ordinaria de la Sociedad Española de Paleontología ha decidido nombrar Socios de Honor a los profesores Guillermo Colom Casasnovas, Luis Vía Boada, José Fernández de Villalta y Bermudo Meléndez.

Estuvieron presentes en Sabadell representantes de la Diputación General de Aragón que presentaron por medio del Director General de Patrimonio el tomo de Comunicaciones de las primeras Jornadas (celebradas en Zaragoza hace un año, así como el volumen 2 de las Memorias del Museo de Paleontología de la Universidad de Zaragoza, y que han sido publicados por el citado organismo autónomo.

También fue presentado el volumen primero de la Revista Española de Paleontología, órgano de difusión de la Sociedad, y que dará a conocer los avances científicos de la Paleontología.

L. Sequeiros

II Premio periodístico Boehringer Ingelheim sobre biotecnología en medicina



Todos aquellos que, por razón de su labor especializada, o por sus conocimientos e interés en los campos de la ciencia y la salud, difunden noticias sobre los mismos a través de los medios de comunicación –radio, prensa o TV– son los portadores de un importante mensaje a la comunidad: aquél de los avances científicos y tecnológicos que, en todos los sectores, repercuten de forma significativa en el bienestar humano.

Así lo entiende Boehringer Ingelheim, dedicada a la investigación biotecnológica, y por ello creó, en 1985, el Premio anual sobre esta especialidad, con el propósito de estimular la valiosa tarea de difusión informativa que tantos profesores realizan. En 1985, el galardón recayó en el Dr. Josep del Hoyo Calduch, por el capítulo dedicado a la ingeniería genética dentro del Programa «Curar-se en Salut», de TV3.

Las Bases del Premio pueden ser solicitadas del Gabinete de Comunicación de Boehringer Ingelheim, Balmes 184, 08006 Barcelona, o llamando al (93) 217 66 54.

V Jornadas Culturales de Aller

Las *Jornadas Culturales de Aller* son una iniciativa del I.B. «Príncipe de Asturias» de Aller cuyo origen se remonta al año 1983, con la celebración de un encuentro –las «Conversaciones sobre Ortega»– para conmemorar el centenario de Ortega y Gasset. Con tal motivo fue cuajando en el Instituto la idea de celebrar anualmente unas Jornadas que permitieran potenciar el trabajo de investigación de los profesores de Bachillerato, integrar a los alumnos en la tarea creativa de la reflexión no estrictamente escolar y ser un foco cultural, así como un foro de debate, en el seno del Concejo de Aller, nuestro entorno inmediato.

Las sucesivas ediciones de las *Jornadas Culturales* –«Asturias en la encrucijada: un reto para los asturianos»; «Minería y Medio Ambiente»; «Asturianos fuera de Asturias»– han sido importantes hitos en la actividad cultural allerana, con resonancia regional y aun nacional que avalan su interés. En 1984 recibieron un accésit al Premio Giner de los Ríos de innovación educativa.

El Instituto «Príncipe de Asturias» convoca ahora las *V Jornadas Culturales de Aller* con el tema «LA ILUSTRACIÓN Y LOS ORÍGENES DE LA INDUSTRIALIZACIÓN EN ASTURIAS». Su objetivo es analizar cómo los ideales ilustrados, reaccionando contra las condiciones de su propia época, hacen posible la gestación de un espíritu transformador que cristaliza en los primeros asentamientos industriales en nuestra región. Asimismo se pretende reflexionar acerca de la vigencia de ese espíritu ilustrado a la hora de asumir nuestro futuro, horizonte en el que las *Jornadas* han intentado situarse siempre, en la convicción de que toda reconsideración del pasado es estéril si no trasciende sus propias coordenadas temporales.

Las *Jornadas* se desarrollarán en cuatro sesiones, cuyos temas específicos serán los siguientes:

- Coordenadas históricas desde las que surge la Ilustración en España.
- Problemas y propuestas de los Ilustrados.
- Características del comienzo de la industrialización en Asturias.
- Los orígenes de la Industrialización en Aller.

Invitamos, pues, a todos los especialistas que deseen participar, y muy especialmente a los Profesores de Bachillerato. No pretendemos tanto el desvelamiento de aspectos novedosos –lo que sería sin duda deseable– como la puesta en común, desde Aller, de un espíritu, una época y unas soluciones que han determinado nuestro presente y es preciso tener en cuenta para afrontar el futuro.

Las *Jornadas* se celebrarán en el Salón de Actos del Instituto los días 18, 19, 20 y 21 de marzo de 1987, en sesiones de tarde. Las participaciones no sobrepasarán los 15 minutos de lectura, ya que se trata de plantear el mayor número de aspectos. Cada sesión finalizará con una conferencia, aún sin determinar, y un coloquio.

El plazo para comunicar el título de la intervención se cierra el día 30 de enero de 1987, y el texto deberá obrar en poder de la organización en la fecha de su exposición para garantizar la inmediata edición de las *Actas*.

Para mayor información, confirmación y correspondencia en general, deberán dirigirse a:

SECRETARÍA DE LAS V JORNADAS CULTURALES DE ALLER
I.B. «Príncipe de Asturias»
Sotiello s/n – 33670 ALLER (ASTURIAS)
Tfno.: (985) 48 04 69.

INFORMÁTICA

Exhibit, la exposición



Tras su paso por la capital de España se ha instalado en los jardines del palacio de Pedralbes de Barcelona, la exposición de Tecnología de la Información Exhibit que patrocina IBM y va destinada especialmente a la juventud.

El largo túnel de cristal formado por 34 arcos de pirámides de policarbonato fue diseñado por el arquitecto Renzo Piano. El edificio resultante se integra admirablemente en un entorno natural gracias a su transparencia y a su geometría que recuerda la estructura de numerosas moléculas orgánicas.

Desde París hasta Bruselas serán 18 las ciudades de 12 países las elegidas para albergar la exposición a lo largo de más de tres años.

En su interior, Exhibit dispone de numerosos puntos de atracción para el visitante. En cada uno de ellos, un chico o chica, estudiante universitario, explica con concisión no exenta de vehemencia en qué consiste la demostración.

Así podemos observar cómo se fabrica un chip, vemos actuar un par de robots, nos maravillamos ante las múltiples posibilidades de las pantallas gráficas en diseño e investigación, podemos admirar un microscopio de efecto túnel comprendiendo la base física de su funcionamiento,...

Sin embargo, tal y como la propia IBM anuncia, las estrellas del Exhibit son dos: el PC y la juventud. En efecto, las aplicaciones del Ordenador Personal de IBM son muy numerosas y espectaculares. En cuanto a los jóvenes,... la sucesión de colegios no se interrumpe durante el horario de la exposición.

Casi un millón de europeos han visitado Exhibit hasta el momento. Con estos datos creemos que los objetivos de IBM Europa al idear la exposición han quedado ampliamente rebasados.

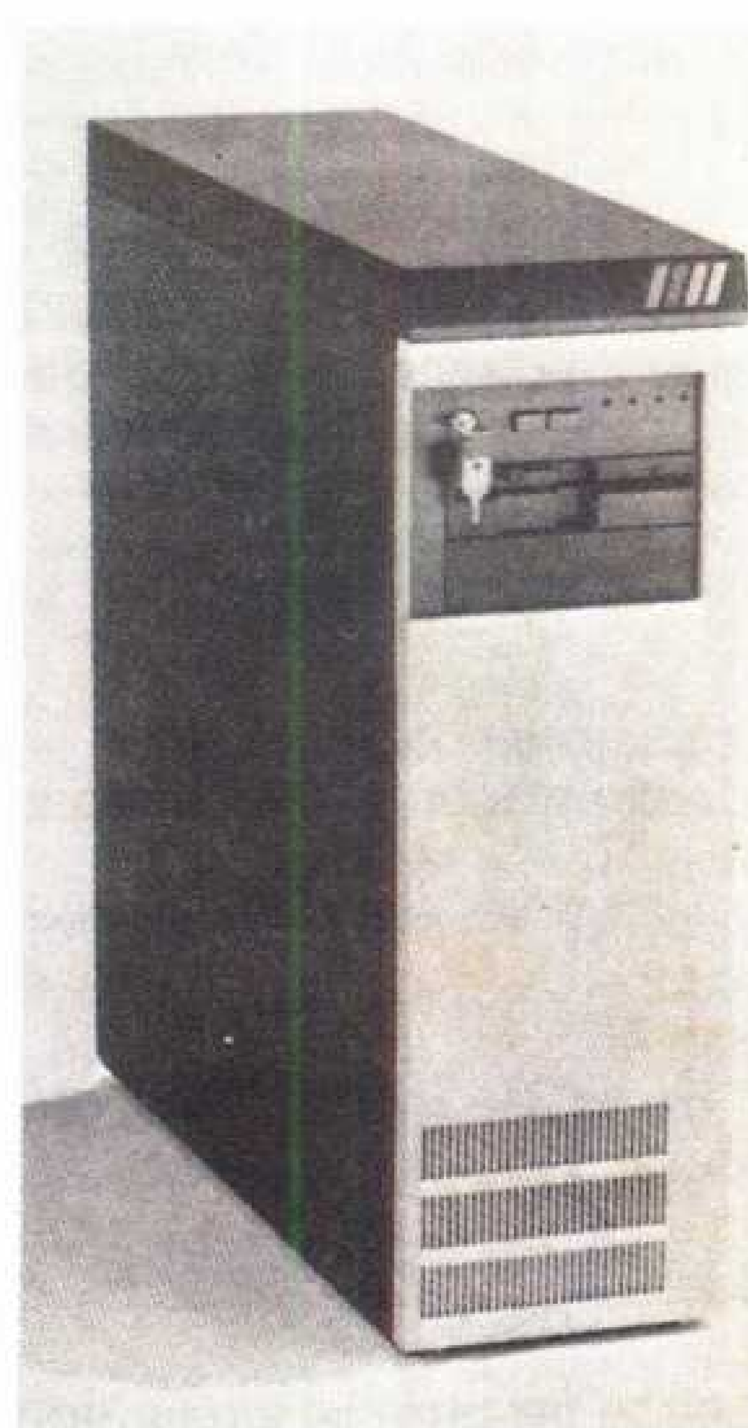
Nuevo ordenador APD 32/16

Tras el impacto de la serie Europa, APD acaba de presentar sus nuevos equipos pertenecientes a la serie 32xx. El modelo más potente actualmente es el APD 32/16 pero el fabricante tiene previsto otras dos nuevas configuraciones hasta la 32/40 con 15 Megas de memoria central y hasta 32 puestos de trabajo.

De momento, el APD 32/16 presenta algunos aspectos técnicos de interés como son la existencia de diversos microprocesadores y tres buses del sistema para el trasvase de información. Respecto a los microprocesadores cabe citar el 80286 a 8 MHz como procesador central, el 82258 para entrada/salida, el 8207 para memoria y el 80287 como coprocesador aritmético (opcional). De los tres buses utilizados (Multibus I, 32xx y dSBX), los dos últimos han sido desarrollados por el propio fabricante con vista a una mayor optimización de los recursos.

La configuración básica consta de 1 Mega de memoria, 16 salidas RS232C para terminales y/o impresoras, un controlador de «hard disk» (hasta un máximo de 240 Megas), un controlador de «floppy» un «streamer» de 60 Megas.

Finalmente el soporte lógico consta de 3 sistemas operativos, para todos los gustos de los usuarios. Desde el Theos 286 (Real y Virtual) hasta el iRMX, pasando por el Xenix versión 3.0. Bajo Theos están disponibles un ensamblador, Basic (compilador e intérprete) y C.



APD avanza sustancialmente sus posiciones con la presentación de esta nueva serie que, a buen seguro, le abrirá nuevos mercados.

Paquete KER para médicos presentado por Small

A finales del pasado año se celebraron en diversos lugares de nuestro país varios cursillos dirigidos a médicos en los que se presentaba el paquete KER, diseñado por la empresa Small, especialista en software médico.

El citado paquete consta de 4 programas: Agenda, Fichero de pacientes, Historias clínicas e Interacción de fármacos. Todos los programas permiten sustentar la información de cinco médicos durante los años que permita la capacidad del ordenador.

El programa Agenda está destinado a optimizar la organización de las tareas que se realizan en una consulta o clínica. De esta manera se asigna tiempo y recursos (tanto materiales como humanos) de la forma más racional según las necesidades. Permite almacenar información confidencial y puede usarse también como agenda personal paralela.

El Fichero de pacientes es un programa que gestiona los datos personales y contables de los pacientes. También se pueden añadir datos complementarios referentes a fechas o bien extraer información global selectiva, tanto demográfica como administrativa.

Las relaciones médico-paciente se almacenan y consultan gracias al programa Historias clínicas. A partir del nombre del paciente, puede recogerse toda la información almacenada e incluso representar algunos datos mediante diagramas de barras. Existe la posibilidad de introducir nuevos datos con texto libre o bien utilizar gráficos y cuestionarios previamente establecidos por el propio usuario.

Finalmente, y de acuerdo a las recomendaciones de la OMS, hallamos el programa Interacción de fármacos. Con capacidad para contener hasta 64.000 fichas de medicamentos, pueden consultarse las interacciones, contraindicaciones, precauciones y advertencias entre todos ellos. También pueden añadirse las marcas comerciales más usuales.

Proyectos Informáticos para Barcelona'92



Se ha iniciado ya la cuenta atrás con vistas a la celebración de la 25 Olimpiada de la era moderna, en Barcelona. Actualmente, entre otros, están en marcha dos proyectos informáticos ciertamente interesantes.

El primero de ellos se conoce con el nombre de Olimpia y consiste en una base de datos que almacena todos los resultados olímpicos. Está previsto que su acceso sea «online» y por cualquiera que pueda acceder a redes internacionales de comunicaciones. Toda la aplicación se basa en el sistema Basis de Centrisa salvo la representación gráfica, a cargo del propio terminal VT-240 y el DEC-Graph. Hasta ahora están recogidas todas las medallas en todas las disciplinas desde 1896, todos los récords olímpicos y mundiales del siglo xx, información sobre la Carta Olímpica, etc.

El segundo proyecto es un sistema de ayuda para la elaboración de calendarios de actividades. Ha sido denominado SUCCES-92 y han intervenido en su realización técnicos de la Universidad Politécnica de Cataluña y de la Oficina Olímpica de Barcelona. Partiendo de un conjunto de condiciones dadas, el paquete genera un calendario y horario de competiciones que puede irse mejorando según las indicaciones del usuario, velando el ordenador en todo momento que no se violen las condiciones iniciales.

Estamos seguros de que en los próximos años asistiremos a un importante auge de las comunicaciones en Barcelona y en toda España gracias a la dinamización prestada por la Olimpiada.

Una nueva hormona del cerebro

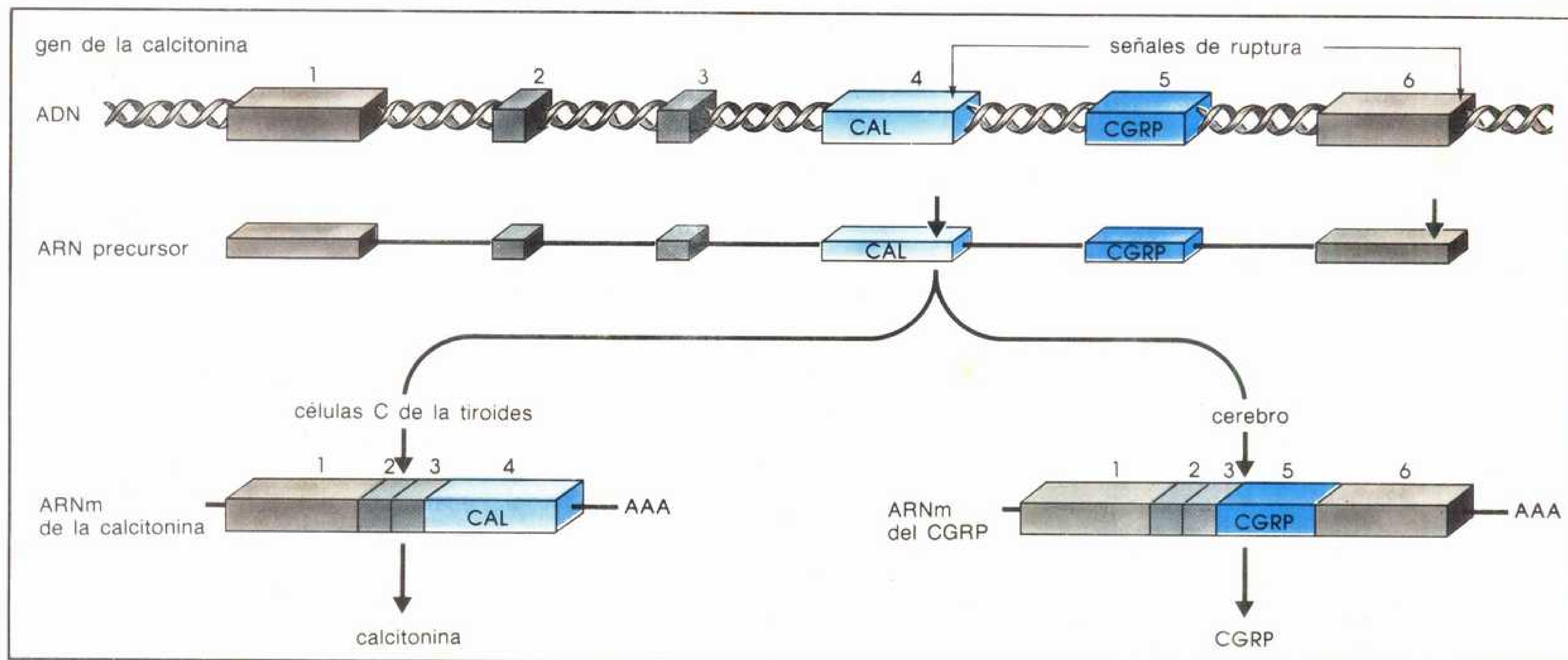
El funcionamiento armonioso de los organismos complejos está asegurado gracias a unos sistemas especializados en las transferencias de información. El más conocido es el sistema nervioso central. El sistema hormonal es el segundo, donde unos mensajeros químicos, las hormonas, circulan en el cuerpo y actúan sobre toda célula que posea unos receptores capaces de reconocerlas. Hasta finales de los años 1970 sólo se conocían las hormonas llamadas «clásicas»: insulina, testosterona, etc. Luego, el número de hormonas identificadas literalmente explotó. Entre esas «recién llegadas», las neurohormonas y más concretamente los neuropéptidos producidos por las células nerviosas y otros muchos tipos de células en el organismo ocupan un lugar particular. Los neuropéptidos tienen importantes funciones en la fisiología general y el comportamiento (véase «Los opios del cerebro» en nuestro número de enero de 1983). Son numerosos: comprenden por lo menos una cincuentena, todos diferentes entre sí, y esta diversidad es sorprendente. ¿Aumentará el número de estas hormonas? ¿Cómo localizar nuevas hormonas? En fisiología se parte clásicamente de la observación de un fenómeno como, por ejemplo, las variaciones de la concentración en glucosa de la sangre, para remontarse a sus causas, en este caso debidas a una hormona, la insulina. Es mucho más infrecuente predecir la existencia de una nueva hormona simplemente fundándose en el examen de un fragmento particular del ADN del patrimonio hereditario. Tales predicciones se encuentran más bien en astronomía o en física. Es, no obstante, exactamente lo que acaba de ocurrir con la historia del descubrimiento de una nueva neurohormona llamada «CGRP» por S. Amara, R. Evans y M. Rosenfeld, en sus laboratorios de San Diego en California.

Un gen que gobierna dos mensajeros diferentes

Las neurohormonas son pequeñas proteínas, péptidos, y toda la información relativa a su estructura está contenida en su gen, es decir, en un fragmento del ADN de los cromosomas. Para una hormona, así como cualquier otra proteína, lo que se llama «expresión» del gen es una serie de acontecimientos muy conocidos: el gen es primero recopiado [illegible]amente en un ARN llamado precur[illegible]n general una alternancia de zonas que codifican para la proteína, los exones, [illegible]parados por unas zonas no codific[illegible]s, los intrones. Este ARN precurs[illegible] sufre después una maduración que le lleva al estado de ARN mensajero. El orden de los aminoácidos en la proteína que surge de la descodificación del ARNm es determinado por el de las bases nucleicas (los nucleótidos A, T, C, G) a lo largo del ADN y del ARN. Todo esto es perfectamente conocido. Se espera pues encontrar un gen para cada neurohormona peptídica.

La historia del CGRP empieza en 1981 en los laboratorios de R. Evans y M. Rosenfeld en San Diego. Estos investigadores estaban estudiando la expresión del gen de una hormona clásica, la calcitonina, que controla el metabolismo del ca[illegible] en el organismo. Normalmente, e[illegible]s células llamadas C de la glándula [illegible]ides que producen la calcitonina, el ARNm de esta hormona es descodificado en una proteína más larga, y posteriormente separado en tres fragmentos cuyo péptido central es la calcitonina. Por otra parte, este proceso es clásico: las hormonas suelen ser producidas a partir de un precursor que las contiene. El caso de la calcitonina parecía pues común.

Algunos tumores de las células C de las tiroides estudiados por este grupo de San Diego se habían vuelto incapaces de producir calcitonina, aunque el gen de esta hormona fuera copiado en ARNm. Este ARNm que procede del gen de la calcitonina, fue llamado ARN-CGRP, proviniendo esta última sigla de *Calcitonin-Gene-Related Peptide*,[1] pues aunque algunas regiones eran idénticas a las del ARN de la calcitonina, pronto se advirtió que este nuevo ARN, si efectivamente era descodificado en proteína, debería dar origen a un péptido que no la habría contenido... Paradoja: ¿cómo podía el único gen de la calcitonina ser responsable de la producción



La calcitonina es una hormona clásica, conocida desde hace tiempo y producida por las células llamadas C de la glándula tiroides. En el patrimonio hereditario de cada hombre no existe más que un único gen de la calcitonina. Éste es un gen mosaico, constituido de regiones (en bloques gruesos) que se encuentran en los ARN mensajeros, y llamadas exones, y de unas regiones llamadas «intrones», que serán eliminadas durante la maduración que hace pasar el ARN precursor, copia correspondiente al gen, en ARN mensajero capaz de ser descodificado en proteína. El exón 4 del gen de la calcitonina llamado CAL codifica para la hormona calcitonina, mientras que el exón 5 codifica para otra hormona, llamada CGRP y que parece importante en la fisiología cardiovascular. Según los tipos de células donde el precursor común es producido, una determinada señal situada en el ADN y señalada con una flecha favorece la producción ya sea de calcitonina, ya sea de CGRP. Así, un mismo gen puede producir dos hormonas de estructura y de funciones muy diferentes. El viejo dogma «un gen –una proteína» es arrinconado y esta propiedad se revela susceptible de aumentar la capacidad de codificación del patrimonio hereditario.

(1) M.G. Rosenfeld *et al.* *Nature, 290,* 63, 1981.

de este mensajero sorprendente? En biología molecular no hay dos maneras de abordar este tipo de problema: hay que determinar la secuencia de los nucleótidos en el gen de la calcitonina, así como en los dos tipos de ARNm que derivan de él, y compararlos.

Como numerosos genes de los organismos superiores, el de la calcitonina es un mosaico de regiones que codifican para determinadas partes de la proteína (los exones) separadas por zonas que aparentemente no codifican para nada, los intrones, eliminados durante la maduración final que produce el ARNm. La comparación de las secuencias del gen y de los dos ARN mensajeros mostraría que los tres primeros exones son idénticos en los dos ARN mensajeros.[2] Pero, si en el ARNm que codifica para la calcitonina, el exón 3 está unido directamente al exón 4, en el ARNm-CGRP, el exón 3 está unido al exón 5, eliminando pues totalmente el exón 4 y, al mismo tiempo, la capacidad de codificar para la calcitonina que, esencialmente, está contenida en el exón 4. Así, según las circunstancias, el gen de la calcitonina puede producir dos mensajeros diferentes: uno que sirve para producir calcitonina, y otro que todavía no se sabe para qué sirve...

El descubrimiento de una nueva hormona

Podemos preguntarnos si esta extraña propiedad es una simple curiosidad observada en células tumorales, en cierto modo aberrantes, hecho, en 1983, Rosenfeld y sus colaboradores demostrarían que el ARNm-CGRP estaba presente en las células normales del cerebro. ¿Estaba descodificada en proteína? El análisis de su secuencia permitía predecir la posible existencia de un nuevo neuropéptido, que sería pues el CGRP. Pronto empezó la persecución del CGRP. Fue sintetizado un fragmento del supuesto péptido y se utilizó para producir anticuerpos específicos del CGRP. Era posible entonces buscar en qué células normales se produce esta hormona hipotética.[3] Fue encontrada primero en las células nerviosas, como las correspondientes al olfato y al gusto. Se encuentra también en una estructura de la base del cerebro, el hipotálamo, que suele asociarse a determinados comportamientos. ¿Participa el CGRP en comportamientos de carácter alimentario? Esta hipótesis no puede sostenerse ya que, fuera del cerebro, el CGRP se encuentra en numerosas vísceras y en particular en la unión entre nervios y músculos del esófago y de los músculos esqueléticos. Algunos ganglios nerviosos periféricos contienen cantidades notables del péptido. Pero lo más sorprendente fue encontrarlo en las uniones de las fibras de la musculatura de los vasos sanguíneos, lo cual sugería que podía desempeñar un papel en fisiología cardiovascular.

La bioquímica moderna permite probar fácilmente esta hipótesis. La secuencia de aminoácidos del CGRP se deduce de la de ARNm, por lo que resultó fácil producir el CGRP por vía química (entretanto fue extraído de órganos) e inyectarlo en pequeñas dosis a ratas. Inyectado en el cerebro, el CGRP induce un aumento del ritmo cardíaco y una hipertensión. Inyectado por vía intravenosa, a la inversa, se observa una hipertensión y una disminución del ritmo cardíaco, así como una curiosa inhibición de la producción de jugo gástrico.[4] Por otra parte, un trabajo más reciente sugiere una función en la regulación vascular cerebral.[5] El CGRP tiene, pues, efectos fisiológicos. Así, en menos de un año, la ingeniería genética demostraba la existencia de una nueva hormona, el CGRP, y trazaba a grandes rasgos su papel fisiológico. El CGRP existe por supuesto en el hombre y en otros mamíferos,[6] aunque la situación se ha complicado un poco en el descubrimiento en 1985 de otro CGRP, el beta CGRP, que sólo difiere del otro por un aminoácido pero que procede, no obstante, de otro gen y cuyos efectos son todavía desconocidos.[7]

Unas alternativas difíciles

La cuestión que se plantea el biólogo molecular es ahora comprender cómo una célula produce ya sea CGRP, ya sea calcitonina, a partir de un único y mismo gen. El gen es copiado de la misma forma, en los dos casos, en ARN precursor idéntico.[8] Después de esta etapa, se opera la alternativa CGRP calcitonina. Como se sabe, el acontecimiento inicial de la maduración de un ARN precursor consiste en su ruptura, en la extremidad inferior, a cierta distancia de una señal presente en su secuencia. Lo que es cierto en el caso presente, es que una ruptura del ARN precursor en una señal localizada después del exón 6 favorece la aparición del ARNm-CGRP, mientras que una ruptura después de una señal más abajo del exón 4 favorece la aparición del ARNm calcitonina. Es, pues, la elección del lugar de ruptura la que determinaría el tipo de hormona producido. La preferencia de uno u otro viene determinada por el tipo celular y, por tanto, sin duda por sustancias producidas por los diversos tipos celulares. Es lo que demuestra, por otra parte, el experimento siguiente: la introducción del gen de la calcitonina en glóbulos blancos induce la síntesis solamente de la calcitonina, mientras que la introducción en fibroblastos produce las dos hormonas.[9,10]

Cualesquiera que sean los mecanismos en acción por el momento desconocidos, esta manera original de producir dos sustancias diferentes a partir de un mismo gen, fuente de gran diversidad con una gran economía de medios, tiene lugar sin duda en el desarrollo del cerebro, a propósito del cual se requiere un gran número de informaciones genéticas diferentes. Resulta tentador imaginar que semejante elección alternativa de exones, como en el caso de la calcitonina y del CGRP, podría intervenir a nivel de otros genes, creando así una diversidad inesperada, fuente de un claro aumento de la capacidad de codificación del ADN cromosómico.

Alain Israel.

(2) S.G. Amara *et al. Nature, 298*, 240, 1982.
(3) M.G. Rosenfeld *et al., Nature, 304*, 129, 1983.
(4) L.A. Fischer *et al., Nature, 305*, 534, 1983.
(5) Mc Culloch *et al., Proc. Natl. Acad. Sci., USA, 83*, 5731, 1986.
(6) S.J. Gibson *et al., J. of Neuroscience, 4*, 3101, 1984.
(7) S.G. Amara *et al., Science, 229*, 1094, 1985.
(8) S.G. Amara *et al., Mol. Cell. Biol., 4*, 2151, 1984.
(9) M.G. Rosenfeld *et al. Biochem. Soc. Symp., 49*, 27, 1985.
(10) F.E. Lef *et al., Ann Review Biochemistry*, 1986, en prensa.

Una nueva clase de agentes biológicos: los ARN anti-mensajeros

Hace poco más de cuarenta años que está establecido que cada proteína de un organismo vivo cualquiera es codificada por uno de los genes de su patrimonio hereditario, su genoma. La biología moderna intenta comprender los mecanismos que gobiernan la síntesis de estas proteínas, cómo «se expresan» los genes. Pero puede ser igualmente importante el impedir la síntesis de la proteína. Tomemos el caso, por ejemplo, de un virus que infecta una célula humana. Algunas de las proteínas codificadas por el genoma del virus son indispensables para su multiplicación. En consecuencia, se cuenta con que el bloqueo de la expresión de estos genes interrumpe el ciclo de replicación vírica y bloquea la multiplicación del virus. Pero para conseguirlo, estamos relativamente desprovistos. La farmacología, pese a sus clarísimos progresos, no lo logra sino mediocremente. Por su parte, los genetistas saben introducir *in vitro* en ciertos virus unas mutaciones que vuelven a los genes inactivos, pero eso es de poco uso en terapéutica. En cambio, la sagaz explotación del descubrimiento de un modo original de regulación de la actividad de los genes en el colibacilo podría proporcionar perfectamente unas armas de un nuevo tipo para luchar contra parásitos y virus. Este modo de regulación hace intervenir unos ARN anti-mensajeros, también llamados ARN anti-sentido.

La doble hélice pervertida

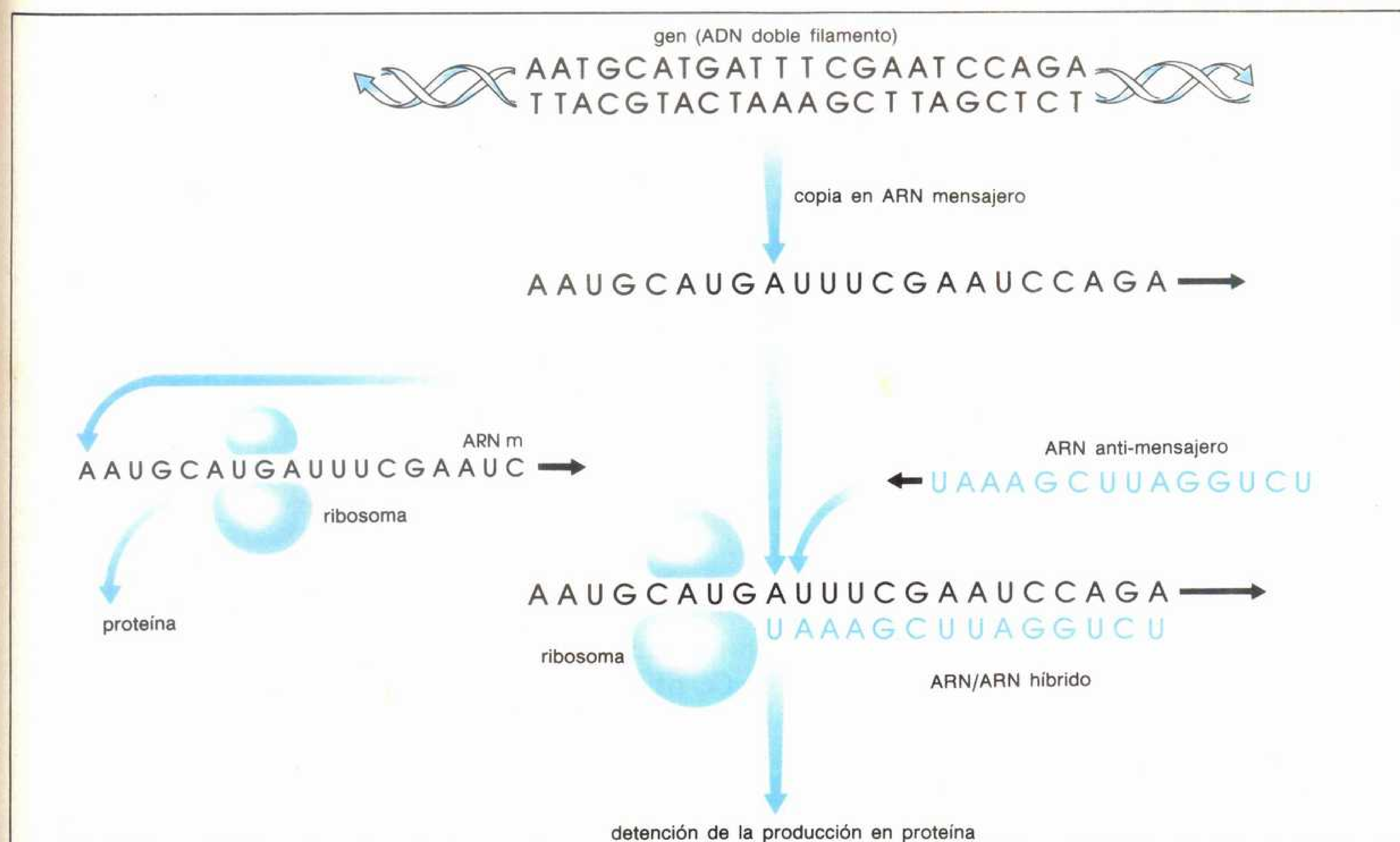
Para comprender realmente qué son estas sustancias y cómo actúan, es preciso dar un salto atrás de veinticinco años. Con el descubrimiento del operón por J. Monod y F. Jacob en 1960 se empezaba a tener una idea bastante precisa de los tipos de mecanismos que gobiernan la expresión de los genes situados en el ADN de un colibacilo. Entre 1960 y 1962 se demostró que la información contenida en este ADN no podía ser utilizada como tal: primero era necesario que fuera copiada en forma de otros ácidos nucleicos, los llamados ARN mensajeros, moléculas inestables utilizadas en la síntesis de las proteínas. Para el gen como para su ARN mensajero, toda la información necesaria para la producción de la proteína que codifican está contenida en su secuencia, resultado del encadenamiento de cuatro tipos de motivos químicos elementales, las bases nucleicas adenina (A), uracilo (U), citosina (C) y guanina (G). (En el ADN, el uracilo es remplazado por la timina –T–). Un ARN mensajero se escribe, pues, como una frase escrita en un alfabeto de cuatro letras. Esta frase es descodificada por pequeñas máquinas, los ribosomas, que leen los nucleótidos del mensajero en orden, pero tres a tres. El orden de los tripletes en el ARN define el orden de los aminoácidos en la proteína. Añadamos a ello unas señales de principio y fin de descodificación y tenemos todo lo que es preciso para que una proteína sea sintetizada. En la gran mayoría de casos, la regulación del nivel de expresión de un gen no es otra que la del número de moléculas de ARN mensajero (ARNm).

Es posible interferir la síntesis de todas las proteínas o de todos los ARNm. Pero ¿cómo impedir la síntesis de tal proteína y de tal otra? La posibilidad de una inhibición selectiva es ofrecida por una propiedad fisicoquímica propia de todos los ácidos nucleicos, ADN o ARN: «la hibridación entre filamentos complementarios». Los nucleótidos tienen la posibilidad de asociarse entre sí por unas uniones no covalentes, formando pares A-U y C-G (A-T en el ADN). Cuantos más pares próximos así puedan formarse entre dos cadenas de ácido nucleico, tanto más estable es el complejo resultante. Un filamento de ARN puede así replegarse sobre sí mismo a merced de estos emparejamientos y formar unas estructuras locales que imitan un doble filamento, estructuras que los ribosomas deberán abrir para proseguir con su labor de traducción. Cuando una estructura de esa naturaleza es relativamente estable, la traducción va más despacio. En caso extremo, puede ser parada. Como una situación así desembocaría en el aborto de la síntesis de la proteína en cuestión, no es encontrada como tal en la naturaleza. En cambio, nada impide imaginar que un ARN, que nosotros llamaremos B, tenga una secuencia complementaria del ARN mensajero producido por un gen A, se asocie a él y forme un híbrido de doble filamento, estable, que haga así imposible la traducción del ARNm A. El ARN B sería un *ARN anti-mensajero* del gen A. Es concebible que podamos establecer una regulación de la expresión de los genes sobre un fenómeno así. Lo importante es que este sistema de regulación no quede como único producto de la imaginación de los biólogos moleculares: en 1983, N. Kleckner en Harvard y M. Inouye en Stony Brook, en Estados Unidos, mostraron que es realmente así como se regula la actividad de dos genes del colibacilo.[1] En estas condiciones, cabría probar de inhibir la traducción de otros genes utilizando esta vez unos ARN anti-mensajeros artificiales, capaces de hibridarse con el ARNm producido por el gen cuyo funcionamiento se desea interferir. En principio, la concepción de estos anti-mensajeros es simple: la regla de emparejamiento A-U, C-G, la secuencia del anti-mensajero se deduce simplemente de la del mensajero teniendo en cuenta el hecho de que el extremo de uno está emparejado con el origen del otro. Así, el anti-mensajero de la secuencia AUCGGUAUUC será GAAUACCGAU (véase la figura).

Los recursos de la química de los ácidos nucleicos

El investigador que desea utilizar anti-mensajeros dispone de dos aproximaciones diferentes. La primera se basa en los enormes progresos que ha hecho la química de los ácidos nucleicos en el transcurso de estos últimos años. Hoy sabemos fabricar fragmentos de ácidos nucleicos, oligodesoxirribonucleótidos, en cantidad apreciable. En este caso se tratará, pues, de ADN anti-mensajero. Pero las reglas de asociación siguen siendo las mismas, siendo remplazada la pareja A-U de los híbridos ARN-ARN por la pareja A-T en los híbridos ARN-ADN. La elección de la longitud del anti-mensajero sintetizado por vía química responde a dos criterios. En primer término, la especificidad del efecto buscado: cuanto más corto es un oligonucleótido, más se expone a encontrar secuencias complementarias con las cuales puede emparejarse. Eventualmente, podría entonces inhibir varios genes, además del gen objetivo. Sin embargo, P.C. Zamecnik e Y. Stephenson de Boston, que fueron los primeros en utilizar esta técnica, han logrado bloquear *in vitro* el desarrollo de un virus cancerógeno del pollo, el virus del sarcoma de Rous, con la ayuda de un oligonucleótido de sólo trece bases, sin que las células huéspedes se vieran afectadas.[1] El segundo criterio que interviene en la elección del tamaño del anti-mensajero es la estabilidad de su asociación con su objetivo: cuanto más larga es la secuencia emparejada, más estable es el híbrido y, por consiguiente, más eficaz es el bloqueo. Sin embargo, estos anti-mensajeros deben penetrar en las células y atravesar, pues, la membrana que las rodea. Desde este punto de vista, las moléculas largas están en desventaja. Pero, puesto que se trata de moléculas sintéticas, se pueden conciliar estos imperativos contradictorios introduciendo, en oligonucleótidos cortos, algunas modificaciones químicas que vayan a aumentar su afinidad para

(1) P.J. Green *et al.*, *Ann. Rev. Biochem.*, *55*, 569, 1986.
(2) J.J. Toulmé *et al.*, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, *83*, 1227, 1986.



Todos los ácidos nucleicos, tanto el ADN de un gen como el ARN mensajero, provienen del encadenamiento de moléculas particulares, los nucleótidos, señalados aquí por sus iniciales, A, T, C, G, U. Dos cadenas de ácidos nucleicos pueden asociarse por formación de uniones entre pares de bases: a G de un filamento corresponde siempre C en el otro. A corresponde a T en el ADN, o U en el ARN. El emparejamiento exige además que las dos cadenas sean antiparalelas, es decir que el origen de una se oponga al extremo de la otra. En el momento de la expresión de un gen, uno de los filamentos del ADN es copiado en ARN mensajero y más tarde descodificado por los ribosomas, es decir, traducido en proteína. Si un ARN complementario (en color en el esquema) de una región del ARN mensajero es introducido, puede emparejarse con esta región del ARN mensajero y bloquear así su traducción. Estos ARN anti-mensajeros pueden por otra parte ser remplazados por unos ADN de misma estructura, más fáciles de sintetizar por vía química, y en los cuales se pueden introducir unas modificaciones para aumentar su afinidad para el ARNm objetivo o incluso degradarlo selectivamente. Este conjunto de propiedades hace de los ácidos nucleicos anti-mensajeros unos instrumentos biológicos con numerosas potencialidades.

la secuencia complementaria y su eficacia de penetración. Ésta es la vía que utilizamos en el equipo de C. Hélène, en el Muséum en París, con N.T. Thuong, en Orléans: se fija un colorante en el oligonucleótido por medio de un enlace que le permite intercalarse en el híbrido formado por el ARNm y el anti-mensajero. Esta intercalación, que no perturba el reconocimiento del objetivo, suministra una energía de interacción suplementaria que procura al complejo formado una estabilidad acrecentada en comparación con un híbrido convencional. Tales anti-mensajeros se han revelado, *in vitro,* unos excelentes inhibidores de la traducción de un gen indispensable para el desarrollo del bacteriófago T4, virus que infecta al colibacilo. La inhibición observada es específica y más intensa que la producida por oligonucleótidos homólogos desprovistos de intercalante.[2]

La sengunda aproximación consiste en construir, según los métodos clásicos de la ingeniería genética, un ADN que lleve un fragmento del gen cuya expresión se quiere regular, pero invertido, colocado de tal suerte que el enzima que recopia el ADN en ARN sintetiza una cadena complementaria del ARNm especificado por el gen objetivo. Éste será pues un *ARN anti-mensajero* del mensaje normal (véase la figura). Este ADN es introducido entonces en una célula en cuyo interior el «gen anti-mensajero» se expresa; la formación del híbrido entre el ARNm y el ARN anti-mensajero impide la traducción del mensaje. Esta estrategia ha sido empleada especialmente en 1985 por el equipo de M. Inouye, en Sotony Brook, que logró «inmunizar» unos colibacilos contra el bacteriófago SP introduciendo en las bacterias un ADN que especifica unos ARN anti-mensajeros dirigidos contra unos genes de este virus. Evidentemente, la inmunidad está limitada a este bacteriófago; estas bacterias siguen siendo sensibles a la infección por otros virus.[1]

Aunque no conozcamos aún ejemplo alguno natural de este modo de regulación en los organismos superiores y aunque los mecanismos de traducción sean algo diferentes de los de las bacterias, oligonucleótidos y ARN anti-mensajeros artificiales han sido utilizados con éxito en células eucariontes, inclusive las vegetales.[1, 3, 4] En la actualidad contamos con una veintena de genes sensibles a los anti-mensajeros. Por consiguiente, este modo de intervención en la expresión de un gen no está limitado ni a algunos casos particulares ni al mundo bacteriano.

Los anti-mensajeros pueden convertirse en poderosos instrumentos de estudio en genética molecular, especialmente para alcanzar el papel desempeñado por el producto de genes cuya estructura ha sido determinada, pero cuya función real aún es desconocida. En efecto, esta aproximación podría permitir imitar el efecto de mutaciones, difíciles de obtener por medio de los métodos tradicionales en los organismos superiores. Así, desde 1985, los anti-mensajeros dirigidos contra un gen necesario para el desarrollo de la drosófila, fabricados *in vitro* e inyectados después en embriones, han producido unas anomalías análogas a las observadas en embriones portadores de un gen no funcional.[5] Se han fabricado pues ¡«mutantes sin mutación»! Pero, junto a la investigación fundamental, en farmacología también se esperan importantes desarrollos de los oligonucleótidos anti-mensajeros. Como hemos visto, se puede bloquear así la expresión de genes indeseables: por ejemplo, el desarrollo del LAV, virus responsable del SIDA, ha sido inhibido *in vitro* en 1986 por unos oligonucleótidos complementarios de un ARN vírico.[6] Hemos podido bloquear, por medio de unos oligonucleótidos, la traducción *in vitro* de genes de tripanosomas africanos.[7] Estos parásitos, responsables en el hombre de la enfermedad del sueño, escapan a la destrucción por el sistema inmunitario del huésped cambiando periódicamente de proteína de superficie. Una secuencia de nucleótidos, común a todos los ARNm que codifican para estas proteínas, constituye un blanco de primera para los anti-mensajeros y podría hacer vulnerables los tripanosomas, cualquiera que sea el gen expresado.

Estos desarrollos, por prometedores que sean, tropiezan con grandes dificultades. La introducción estable en el seno de una célula de un gen que codifi-

(3) J.R. Ecker, R.W. Davis, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 83,* 5372, 1986.
(4) J.G. Izant, H. Weintraub *Science, 229,* 345, 1985.
(5) U.B. Rosenberg *et al., Nature, 313,* 703, 1985.
(6) P.C. Zamecnik *et al., Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 83,* 4143, 1986.
(7) A.W.C.A. Cornelissen *et al., Nucleic Acids Res., 14,* 5605, 1986.

ca para un ARN anti-mensajero permitiría la producción continua del agente de regulación. Es evidente que esta aproximación no puede quizá ser utilizada más que en investigación fundamental, y aún no en todos los casos. En lo que concierne a la farmacología antivírica o antiparasitaria, los oligonucleótidos sintéticos constituyen pues una alternativa más interesante. Pero deberán resolverse dificultades diversas antes de que se pueda considerar su uso *in vivo*. Ya hemos hecho alusión al paso de la membrana celular. Igualmente se plantea el problema de la degradación de los anti-mensajeros por unos enzimas intracelulares o circulantes. Esta degradación puede ser prevenida, en el caso de los oligonucleótidos, por algunas modificaciones de la molécula.[8] De forma general, la posibilidad de introducir cualquier modificación química susceptible de conferir una ventaja o una propiedad nueva a los oligonucleótidos sintéticos constituye un triunfo importante para este tipo de molécula. Podemos, por ejemplo, fijarle unos grupos capaces de producir daños irreversibles en el objetivo después de la asociación. Dispondríamos así de auténticos misiles capaces de destruir específicamente su objetivo. Actualmente, algunos de estos grupos químicos «activos» son comprobados en diversos laboratorios, entre ellos el nuestro de París.

Este enfoque tiene apenas tres años y sus perspectivas de desarrollo parecen interesantes. No obstante, una utilización razonada de los anti-mensajeros, en particular en Medicina, exige una buena comprensión de los mecanismos de acción de estas moléculas. Estamos lejos de ello: ahora está claro que los anti-mensajeros pueden intervenir desde que la secuencia objetivo ha sido sintetizada, y perturbar varios procesos antes de la traducción o actuar sobre el mensajero incluso sin que su lectura por el ribosoma se vea implicada.[1, 9] Las modalidades de acción pueden no ser rigurosamente idénticas según que se utilice un ADN o un ARN anti-mensajero: enzimas diferentes reconocen los híbridos ARN-ARN y ADN-ARN. Además, se plantea una cuestión suplementaria en cuanto a la universalidad de la utilización de los anti-mensajeros; ahora se conocen algunos casos de «resistencia» a los ARN anti-mensajeros: aunque se puede inhibir fácilmente la traducción de genes en el huevo de sapo no fecundado, D. Melton ha revelado en Boston recientemente la imposibilidad de inhibir genes en los mismos huevos ¡una vez fecundados! De este modo, la explotación óptima de esa nueva estrategia, lo mismo como instrumento de investigación fundamental que como nueva familia de medicamentos, exige previamente unas cuantas respuestas a esas diferentes cuestiones.

Jean-Jacques Toulmé.

(8) C.C. Smith *et al.*, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, *83*, 2787, 1986.
(9) J. Minshull, T. Hunt, *Nucleic Acids Res.*, *14*, 6433, 1986.

Según el padre Moigno, «el ateísmo es la negación de la evidencia matemática».

¿Llevan las matemáticas a Dios?

¿Son las matemáticas una «llama interior y natural que Dios ha encendido en nosotros» para que percibamos mejor las Verdades de la religión cristiana? (1) Muchos lo han creído. En los siglos XVII y XVIII, en particular, varios defensores del cristianismo subrayaron que las matemáticas constituían una oportunidad privilegiada de acercarse a Dios. El Reverendo Padre Bernard Lamy, sacerdote del Oratoire, se expresaba así al principio de sus *Eléments de géométrie* (publicadas en 1685 y varias veces reimpresos): *«Hay que encontrar a Dios en todas las cosas, y el estudio de la Geometría debe llevar a Él. En la Geometría hallamos muchos motivos para pensar en Él. Todo cuanto de bello muestra esta ciencia acerca de las figuras, sus razones y sus proporciones se observa luego en las Obras de la Naturaleza, lo cual permite admirar lo que es propio del Obrero (...) Además del placer espiritual que nos proporciona al insinuar desprecio hacia las voluptuosidades y hacernos más aptos para la moral del Evangelio (...), la Geometría nos hace conocer la vasta extensión de la Ciencia que poseen quienes ven a Dios y nos hace ver cuán grande es el placer de que gozan al descubrir tantas verdades en la Divina Esencia.»* En otro libro *(Entretiens sur les sciences)*, el Padre Lamy observaba que los Padres de la Iglesia habían elogiado la utilidad de esta ciencia de la que «la Escritura habla elogiosamente «y» que Moisés aprendiera de los egipcios y Daniel de los caldeos».(2)

¿Niegan los ateos la evidencia matemática?

Hoy esta clase de discursos pueden parecer artificiales y vanos; sin embargo, eran un lugar común de la literatura apologética y a menudo iban acompañadas de «demostraciones» matemático-teológicas. En la última parte del siglo XIX, el padre Moigno afirmaba todavía enérgicamente el valor religioso de las matemáticas en una obra de título explícito: *Les splendeurs de la foi. Accord parfait de la révélation et de la science, de la foi et de la raison.* No retrocedía ante afirmaciones categóricas como las siguientes: *«el dogma capital de la creación es un mero corolario de la ciencia de los números»; «el ateísmo es la negación de la evidencia matemática».*(3)

El alto valor espiritual de las matemáticas había sido ya proclamado por Platón en el siglo IV a. J.C. Se dice que en la puerta de su escuela había escrito lo que sigue: *«Que no entre aquí quien no sea geómetra».* Según una antigua tradición, Platón habría afirmado también que Dios actúa siempre como geómetra. Aunque se trata de una afirmación apócrifa, numerosos textos confirman que para este filósofo las matemáticas tenían algo de divino. No sólo pensaba que el mundo estaba estructurado geométricamente, sino también que la ciencia matemática tenía un papel esencial en la formación del ciudadano ideal. Cuando se estudian los números y formas perfectos como el círculo, la esfera y los poliedros regulares, se presiente cómo pueden ser el Orden, la Armonía y la Medida en sus modalidades más perfectas; uno se convence entonces de que sólo un Dios ha podido engendrar unos objetos tan admirables. En la Cristiandad, el tema tuvo un gran éxito y fue utilizado de mil maneras. El platonismo cristiano, por lo demás, podía fundamentarse en determinados textos bíblicos. Así, una oración del *Libro de la sabiduría* (11.20) contiene la frase siguiente: *«Todo está ordenado de acuerdo con la medida, el número y el peso.»* El mensaje es claro: hacer matemáticas es acercarse a Dios...

En San Agustín (354-430), se encuentran ya «demostraciones» basadas de modo privilegiado en la geometría o la ciencia de los números. En su tratado sobre *La grandeza del alma,* por ejemplo, aparecen varias figuras geométricas: cuadrados, triángulos, círculos, etc. Su objetivo es refutar la opinión de quienes se imaginan que el alma es un «cuerpo sutil», una especie de fluido o de soplo. Para ello, San Agustín establece que el punto, la recta, el círculo y las demás figuras son unas entidades totalmente abstractas, unas «cosas incorpóreas». Pero los hombres logran percibirlas gracias a su alma. Lo que demuestra que dicha alma es incorpórea, «ni extensa en longitud, ni abierta en anchura, ni consolidada en profundidad».(4)

Una noción clave: el infinito

En su tratado *La docta ignorancia,* el sabio cardenal Nicolás de Cusa (1401-1464) aludió a ese texto. Y Aprovecha la ocasión para citar a Boecio, un romano de la antigüedad tardía impregnado de cultura griega de gran influencia en la cultura medieval (480-525). Según este último, la verdadera ciencia es la del número y la magnitud. Más aún, «la ciencia teológica sería inaccesible para quien careciera de formación matemática». Pues «el principal modelo divino en la mente del Creador ha sido el Número mismo».(5) Según Nicolás de Cusa, una de las principales ventajas de las matemáticas es que permiten demoler los dogmas fundamentales del materialismo. Dicen los epicúreos, en efecto, que sólo existen los átomos y el vacío; esta doctrina «niega la existencia de Dios y destruye toda verdad». Afortunadamente, *«los pitagóricos y los peripatéticos demostraron matemáticamente la imposibilidad de alcanzar los átomos indivisibles y simples que Epicuro suponía en la base de su teoría».*

A

A un instant quelconque t, le *sensorium* optique est sollicité par tous les ébranlements, qui ont, pour ainsi parler, frappé à sa porte depuis l'instant $t - \theta$ jusqu'à l'instant t; en d'autres termes, l'intensité perçue résulte de l'onde qui va sortir du *sensorium*, de l'onde qui vient d'y entrer, et de toutes les ondes intermédiaires de passage. Soit, en général $y = f(t)$, la loi qui détermine, pour l'instant arbitraire t, l'intensité ou la force vive de l'ébranlement qui franchit à cet instant même l'entrée du *sensorium*. La quantité de lumière perçue par l'observateur au temps T, aura pour valeur :

$$q = \int_{T-\theta}^{T} f(t)\, dt$$

et l'intensité de la perception sera :

$$i = \frac{q}{\theta} = \frac{1}{\theta} \int_{T-\theta}^{T} f(t)\, dt = \frac{1}{\theta} \int_{T-\theta}^{T} y\, dt$$

« Dans le cas particulier où $f(t)$ est une constante, c'est-à-dire, où l'on observe un foyer lumineux d'intensité fixe, on a $i = y$, en sorte que la perception donne la juste mesure du phénomène observé; mais, dans toute autre hypothèse, i diffère de y, c'est-à-dire que l'intensité de la perception s'écarte plus ou moins de celle du foyer lumineux. Il est clair qu'un raisonnement analogue est applicable à une sensation sonore, calorifique, etc., et généralement à toute sensation concrète, la valeur du coefficient numérique θ changeant d'ailleurs avec la nature ou l'espèce de cette sensation.

« Arrivons maintenant aux perceptions abstraites. J'étudie, par exemple, le mouvement d'un point matériel sans dimension, sur une droite géométrique. De ce mouvement, intangible pour mes sens, je fais une réalité abstraite, en le représentant par la formule $x = F(t)$, qui détermine, à l'instant arbitraire t, la distance x du mobile à une origine fixe. La force vive correspondante, en supposant la masse du mobile égale à l'unité, sera

$$y = \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 = [F'(t)]^2 = f(t)$$

« Est-il admissible que ma perception de cette force vive théorique dérive de l'ébranlement mécanique d'un *sensorium?* Pour produire un travail mécanique, il faut nécessairement un moteur; or je ne vois pas d'autre cause au phénomène que j'étudie que ma formule analytique elle-même; si donc je veux établir l'identité du fonctionnement de mon organisme cérébral dans l'ordre abstrait et dans l'ordre concret, je me trouve contraint d'admettre qu'une formule d'analyse peut remplacer une force motrice! L'absurdité de cette hypothèse est manifeste; mais passons outre. Soit θ le coefficient de durée relatif au *sensorium* des perceptions abstraites, c'est-à-dire le temps qu'un ébranlement met à traverser cet organe. A l'instant T, l'intensité *perçue* du phénomène observé, c'est-à-dire l'évaluation mentale de la force vive du mobile sera

$$i = \frac{1}{\theta} \int_{T-\theta}^{T} f(t)\, dt = \frac{1}{\theta} \int_{T-\theta}^{T} y\, dt$$

Si θ n'était pas infiniment petit, i différerait de y, en sorte que l'analyse mathématique reposerait sur une aberration mentale. A moins donc que notre raison ne consente à proclamer elle-même son impuissance à découvrir la vérité, nous devons admettre que la durée θ est moindre que toute grandeur assignable, c'est-à-dire que le *sensorium* des perceptions abstraites ne peut pas avoir des dimensions finies; que c'est un atome insécable, indécomposable, inaccessible au scalpel de l'anatomiste. »

(1) La expresión está tomada del prefacio de Clerselier a las *Oeuvres posthumes* de Rohault (1682). Véase G. Maupin, *Opinions et curiosités touchant la mathématique d'après les ouvrages français des XVI, XVII, XVIII siècles,* Carré et Naud, 1898, p. 80.
(2) Misma obra, pp. 133-134, p. 93.
(3) Abbé Moigno, *Les splendeurs de la foi,* tomo III *La révélation et la science* (2.ª parte), Blériot frères, 1879, p. 1267.

Estamos aquí ante un tema que reaparece continuamente en las especulaciones teológicas: el del infinito. ¿Existen límites para la pequeñez de un cuerpo? ¿O siempre es posible subdividir un grano de materia por pequeño que sea? Puesto que el átomo de los antiguos materialistas es «insecable» (tal es el sentido mismo de la palabra átomo) basta «demostrar» la infinita divisibilidad de todas las cosas para aniquilar su doctrina. Por lo que respecta a lo infinitamente grande, la cuestión principal se plantea así: ¿es correcto hablar de un número *«actualmente infinito»*, es decir, *a un tiempo* bien determinado y susceptible de ser considerado como absolutamente grande? Si se responde negativamente y se admite que sólo Dios es verdaderamente «infinito», las enseñanzas materialistas sobre un universo infinito y eterno quedan arruinadas. Por supuesto, puede ponerse en duda la validez de tales razonamientos. Es una objeción filosófica bien conocida: nada garantiza que los razonamientos efectuados con entidades matemáticas ideales puedan traducirse en enunciados que posean un sentido concreto en mecánica o en astronomía.

Pero los filósofos y teólogos de que aquí hablamos poseen una concepción particular de las matemáticas que legitima su empresa. Atribuyen a los objetos matemáticos una existencia totalmente real y obejtiva: los números y las formas «puras» son obra de Dios; pero, además, éste los utilizó sistemáticamente para crear el mundo y todo lo que contiene. Esta epistemología permite pasar a voluntad del campo de las «matemáticas puras» al de la física matemática, la cosmología matemática, etc. En principio, todo resultado obtenido en aritmética, álgebra, análisis o geometría puede transformarse en afirmación sobre los átomos, las dimensiones del cosmos, la existencia de Dios o la naturaleza del alma.

Observamos que estos razonamientos pretenden ser «ilustrados» y, por tanto, rigurosos. Tenemos que distinguirlos de lo que cabría llamar «numerología simbólica», es decir, de los métodos interpretativos que consisten en atribuir valores particulares a algunos números. Así, en ciertos casos, el *tres* puede remitir a la Santísima Trinidad (Padre, Hijo y Espíritu Santo), el *siete*, a los siete días de la creación, el *doce*, a los doce apóstoles. Sin embargo, no hay un límite absolutamente claro entre las pruebas pretendidamente «científicas» y las argumentaciones simbólicas. Sucede, en efecto, que se mezclan consideraciones técnicas con comparaciones bastante vagas. Citemos por ejemplo al Reverendo Padre Léon, predicador de Sus Majestades Muy Cristianas. En 1679, publicó en París una obra en la que exponía las virtudes del punto matemático y procedía a una analogía con Dios.

La parte más pequeña de la Cantidad, explicaba, la que está «más próxima a la nada y es la más indivisible» es el punto. Y proseguía tranquilamente: *«Y ya que, según la máxima de Platón, todo principio es divino, el punto debe poseer esta alta cualidad, pues por él comienzan la línea, el tiempo, los números, el centro y todo cuanto de aquél depende. (De donde se sigue) que Dios, que también es un centro y un punto, debe englobar las cosas más grandes en las más pequeñas»*. Se sacaba sí provecho del punto y la esfera. Pues *«el Globo (...) es la más noble de todas las figuras y el más perfecto de todos los cuerpos. En efecto, esta figura contiene más espacio que todas las demás de parecido contorno. (...) En suma, es el símbolo de Dios, de la Naturaleza, del Hombre, que todo lo hacen en círculo y mediante una circulación continua.»*(6) Apenas es preciso recordar que Blaise Pascal, recuperando una antigua imagen de la tradición hermética, había utilizado la metáfora del círculo para describir a Dios: *«Dios es un círculo cuyo centro está en todas partes y cuya circunferencia no está en lugar alguno.»*

El padre Ignace Gaston Pardies (1636-1673), de la Compañía de Jesús, nos lleva a una «demostración» más refinada: para demostrar que Dios existe, recurre a la consideración de espacios asintóticos. En el caso de ciertas curvas con una o varias asíntotas, en efecto, es posible definir áreas en cierto modo paradójicas: aunque las recetas a las curvas que las determinan tengan una longitud *infinita*, la medida de estas áreas es *finita*. Lo cual impresiona a Pardies por su carácter maravilloso o incluso milagroso. Como escribe en sus *Eléments de géometrie* (segunda edición de 1673), *«estos espacios de longitud infinita son iguales, no obstante, a un círculo o a alguna otra figura determinada: de tal modo, el propio Infinito, aun siendo inmenso e innumerable, se reduce al cálculo y a la medida de la Geometría, y nuestro espíritu, todavía mayor que él, es capaz de comprenderle.»*

De donde se deduce, según este jesuíta, que tenemos un alma: *«No veo nada más apropiado para convencernos de la existencia de nuestra alma»*. Y, sobre



B ***¿Es cierto que Dios dotó a cada hombre de un principio espiritual llamado alma? Las autoridades procuraron muy pronto demostrarlo con la ayuda de variados argumentos. Según San Agustín (B), por ejemplo, sólo la existencia de un alma inmaterial podía explicar la aptitud del hombre para «percibir» entidades matemáticas ideales como el punto, la recta, el círculo, etc. Más tarde, en el siglo XIX, hubo creyentes que intentaron transformar en demostraciones matemáticas rigurosas estos alegatos espiritualistas. El matemático Félix Lucas, del que reproducimos buena parte de la argumentación (A), se basaba en una comparación entre percepciones concretas y percepciones abstractas. Ello le llevaba a preguntarse cómo era posible que el espíritu humano pudiera captar el movimiento de un punto ideal tal como queda descrito en forma matemática. El razonamiento no se deja resumir de un modo sencillo. Supongamos que el punto en movimiento tiene una fuerza viva capaz de estimular nuestro sistema perceptivo, nuestro «sensorio»; para comprender cómo se operan percepciones matemáticas, declaraba Lucas, hay que admitir entonces que nuestro «sensorio» no tiene dimensiones finitas. El argumento es más bien alambicado. Pero Lucas pensaba haber obtenido una «prueba» real de la existencia del alma. A los lectores ingenuos, las majestuosas integrales que acompañan al texto podían parecerles signos indudables de cientificidad... (Foto A, montaje realizado a partir del libro del padre Moigno, Les splendeurs de la foi; B, foto Roger Viollet.)***

(4) San Agustín, *Diálogos filosóficos* (trad. fr.) Desclée de Brouwer, 1955, pp. 364 y siguientes. Sobre el tema «imperio universal de los números» véase por ejemplo, p. 239 p. 245.

(5) Nicolas de Cusa, *Obras escogidas* (trad. fr.) Aubier, 1942, pp. 81-82.

(6) Véase G. Maupin, obra citada, p. 75.

Un tema a menudo utilizado por los apologetas: la imposibilidad del número infinito.

todo, «nos da una prueba invencible de la existencia de Dios». ¿Por qué? Porque sólo Dios puede haber engendrado una realidad en la que se conjugan tan notablemente lo infinito y lo finito. El razonamiento es algo prolijo (y un poco oscuro...) pero ilustra bien una cierta retórica: la geometría demuestra que: *«incluso suponiendo, como se pretende, que hay una serie de causas subordinadas y dependientes unas de otras hasta el infinito, hay que llegar necesariamente a una primera naturaleza que, concurriendo con todas estas causas y correspondiendo con todos los tiempos, sea a su vez infinita y eterna; y que, no produciendo por sí sola ninguna de estas causas sin el concurso y la determinación de las demás, sea, sin embargo, la causa general que produce y conserva todas las cosas».*

Por decirle a la manera de Pardies, hace falta la «impiedad de los libertinos» para negar una tal evidencia... Este estilo de argumentación permite hallar fácilmente numerosas «pruebas matemáticas» de la existencia de Dios. Toda serie convergente (como la serie clásica de término general $u_n = 1/n!$) adquiere una dignidad teológica genuina; ¡No ocurre lo mismo con las series divergentes, en las que no aparece la afortunada unión de lo finito y lo infinito! Pascal, por su parte, había aprovechado la ocasión para meditar sobre los misterios del ser: *«Lo incomprensible no por incomprensible deja de ser. El número infinito. Un espacio infinito igual a lo finito.»*

El uso teológico de la regla y el compás

También en el siglo XVII, un prelado español, Caramuel de Lobkowitz, redactó una *Matemática audaz (Mathesis audax)* en la que confirmaba mediante esta ciencia la verdad de los dogmas. D'Alembert nos ha dejado un comentario no desprovisto de ironía: *«El autor, geómetra intrépido, y teólogo luminoso, resuelve con la única ayuda de la regla y el compás todos las cuestiones teológicas, principalmente las que conciernen al libre arbitrio y la gracia»...*[7] Pero había hecho falta mucho más para poner coto a las ambiciones demostrativas de los matemáticos creyentes. El caso del padre Moigno nos permitirá confirmar la vitalidad de las especulaciones matemático-teológicas en el siglo XIX.

En nuestros días, el padre Moigno ha caído en un total olvido. Pero se trataba de una personalidad importante que conocía muy bien las ciencias de su tiempo. Nacido en 1802, había recibido una sólida formación física y matemática. En el *Grand dictionnaire universal* de Pièrre Larousse, se le califica de «sabio notable»; llegó incluso a abandonar la Compañía de Jesús, a la que pertenecía, para proseguir sus trabajos científicos. Entre las numerosas obras que nos ha dejado figuran unas importantes *Leçons de çalcul différentiel et intégral* que siguen de cerca los textos publicados o inéditos de Cauchy. Pero este científico era también un ardiente apologeta. A fines del siglo XIX publicó una vasta obra destinada a demostrar lo bien fundado de sus convicciones religiosas: *Les splendeurs de la foi.*

Cita allí entre otros a un «distinguido matemático», Félix Lucas, que «aplicó con éxito el análisis a la demostración de la simplicidad del alma estudiada en el acto de la sensación». Es imposible desmenuzar aquí esta demostración; pero se trata de una especie de pequeña obra maestra.[8] Aparecen en ella varias integrales destinadas a dar fe de la «seriedad» del autor en su comparación entre «percepciones concretas» y «percepciones abstractas». El objetivo consiste en «demostrar» que, cuando hacemos mecánica teórica (estudio del movimiento de un punto material sin dimensiones) nuestra percepción intelectual se realiza necesariamente en un lapso de tiempo infinitamente pequeño. Si no fuera así, afirma el autor, «el análisis matemático estaría basado en una abstracción mental». Reproducimos una parte importante de la demostración en una ilustración. Para introducir su argumento, Lucas fingía admitir la hipótesis siguiente: cuando un hombre percibe intelectualmente el movimiento de un punto, este último altera su *sensorio* (es decir, su sistema cerebral).

Aunque al decir de Moigno, incluso el gran Ampère reflexionó sobre la energía cinética de un espíritu puro en movimiento, la hipótesis de un punto imaginario que altera nuestro organismo es difícilmente admisible... Félix Lucas, precisamente, demuestra que conduce a contradicciones. Lo cual le permite afirmar que nuestra alma, la única capaz de «percepciones abstractas», es «insecable, indescomponible, inaccesible al escalpelo del anatomista». Mediante este rodeo, el materialismo sufre una nueva derrota.

Manejando unos argumentos análogos, San Agustín había tenido por lo menos el mérito de ser fácilmente comprensible. Es preciso constatar que la prueba de la inmaterialidad del alma, al perfeccionarse, se oscurece sensiblemente. En realidad, como sugiere el padre Moigno, las matemáticas han permitido a Lucas rejuvenecer la forma de un viejo argumento filosófico; el propio Moigno indica que un jesuíta, el padre Augustín de Barruel, ya había desarrollado dicho argumento en una obra publicada en 1785: *Helviennes, ou lettres provinciales philosophiques.* En cualquier caso, la religión rinde aquí homenaje a la ciencia: todo ocurre como si determinados creyentes, para lograr una mayor aceptación de los dogmas, se sintieran obligados a hacerlos «científicos».

El número infinito no existe; por lo tanto, el mundo tendrá un fin...

Algunos podrían imaginar que sólo se arriesgaron a tales acrobacias apologéticas matemáticos de segunda clase. Pero nada es menos cierto, como nos lo hace saber el padre Moigno. Pues el eminente matemático Cauchy (1789-1875) dio en 1832 unas lecciones en las que se «demostraba» la siguiente afirmación capital: el mundo tuvo un principio y tendrá un fin (por lo que los materialistas están en un error). El razonamiento gira una vez más en torno a la noción de infinito. Cauchy, volviendo a ideas que se remontan a Galileo, comienza por establecer que el inicio actual no existe. Si se imagina la sucesión de los números naturales prolongada hasta el infinito, declara este autor, no cabría encontrar en ella a la vez los números naturales (1, 2, 3, 4, 5...) y los cuadrados de cada uno de ellos. Pues, en semejante sucesión «los números cuadrados (...) serían muy minoritarios». Lo cual es incompatible con la hipótesis del *infinito actual;* debería de haber «con cada término no cuadrado, el cuadrado de este término, el cuadrado de su cuadrado, etc.». Por lo tanto, se cae en «contradicciones manifiestas» y es preciso admitir que «todo número es esencialmente finito».

Viene luego la aplicación a los objetos, a los seres vivos, o a los acontecimientos: puesto que el número infinito no existe, ningún conjunto de objetos, seres o acontecimientos puede ser infinito. En palabras de Cauchy, «hubo un primer hombre, un primer instante en que la Tierra apareció en el espacio, otro instante en el que el mundo mismo empezó, etc., etc.». Y la Biblia tiene razón; *«Al principio, Dios creó, el cielo y la tierra».* He aquí la conclusión del curso de Cauchy tal como la relata Moigno: *«Así, la ciencia nos hace volver necesariamente a lo que nos enseña la fe: la materia no es eterna; y si el primero, el más antiguo de todos los libros no nos hubiera revelado claramente esta verdad, si no la admitiéramos como cristianos, estaríamos obligados a admitirla como aritméticos, como matemáticos.»*

El argumento no era nuevo. Uno de los predecesores de Cauchy había sido el cardenal Hyacinthe Sigismond Gerdil (1718-1802), un piamontés que pertenecía a la orden de los barnabitas y había estado a punto de suceder el Papa Pío VI. En su Demostración matemática contra la eternidad de la materia se basaba también en la imposibilidad del número infinito. Basta recurrir a «la más elemental de las ciencias, la aritmética» para demostrar que los ateos están en el error. «Sostener que todo ser viviente desciende de otro semejante a él y que el estado presente del globo terrestre ha sucedido a un número infini-

(7) Véase G. Maupin, misma obra, p. 162; y la entrada Caramuel (Jean de Lobkowitz) en el *Grand dictionnaire universal* de Pierre Larousse (tomo III).
(8) Véase padre Moigno, *Les splendeurs de la foi,* tomo III ya citado, pp. 1339 y siguientes.
(9) Misma obra, pp. 1262-1264.

to de estados diversos», es «una quimera y un sinsentido». El propio padre Moigno no resistió a la tentación de volver al argumento. Entre una obra sobre el sacarímetro y otra sobre el progreso científico e industrial, compuso un alegato muy cristiano: *L'impossibilité du nombre infini et ses conséquences. Démonstration mathématique du dogme de la création et de la récente apparition des mondes* (1863). Sin duda, consideraría actualmente que la teoría del *big bang* aporta una nueva confirmación del mismo dogma.

Determinación algebraica de la fecha de la Creación

Con objeto de poner de manifiesto la contribución del «álgebra» a la religión, el padre Moigno cita a Faâ de Bruno, «uno de los alumnos más queridos y distinguidos de Cauchy». No es una «prueba» matemática pura, ya que se apoya en datos demográficos. Pero está basada en cálculos en principio muy fiables. El problema es el siguiente: ¿en qué momento fue creado el hombre por Dios? Para responder a este tipo de cuestiones, los expertos en ciencia bíblica contaban las generaciones, que según la Escritura, se sucedieron desde Adán y Eva. Como que el relato del Génesis era tomado en general al pie de la letra, se identificaba prácticamente la creación del hombre con la creación del mundo. Se solía admitir que la duración transcurrida era de unos seis mil años. En el siglo XVII, el irlandés James Usher, un miembro de la Iglesia anglicana que llegó a ser arzobispo de Armagh, había conseguido fijar una fecha muy precisa: la creación tuvo lugar el año 4004 antes de Cristo... Faâ, en el siglo XIX, abordó el asunto preguntándose cuánto tiempo tuvo que pasar para que la Tierra quedara poblada tal como lo estaba entonces.

Hacia 1860, la población mundial se estimaba en mil trescientos millones de hombres. Si se admite que «el aumento de la población humana es cerca de un doscientosavo», entonces «la teoría bien conocida de las progresiones» nos permite averiguar cuántos años tuvieron que pasar para llegar a la población actual. Basta resolver la ecuación siguiente:
$2(1 + 1/200)^x = 1.300.000.000$, en la cual x representa el número de años transcurridos desde la creación del mundo. El resultado (4.068 años) es «realmente extraordinario», declara Moigno. Naturalmente, la evaluación final debe tener en cuenta el Diluvio universal del que habla la Biblia pues «interrumpió bruscamente la marcha creciente de la población humana». Se llega así a un orden de magnitud de unos seis mil años, que cabe considerar «como la expresión de la verdad». Milagrosamente, por así decir, el álgebra confirma la estimación del arzobispo Usher: Dios creó nuestro mundo hacia el año 4.000 a J.C.[10] El propio padre Moigno perfeccionó el argumento proponiendo otro cálculo del mismo tipo en el que la tasa de crecimiento de la población es un poco distinta y donde la fórmula se aplica directamente «a los 4.025 años transcurridos desde el diluvio». Como dice el autor, «recordemos que Noé salió del arca con su mujer, sus tres hijos y las mujeres de sus tres hijos, ocho personas en total». Una vez más el resultado es excelente. *«La impiedad mintió al oponer las ciencias humanas a las ciencias divinas» QED...*

Digamos de paso que el cristianismo no engendró tan sólo especulaciones matemáticas tan nobles como éstas. Ocurrió también que el Evangelio y las instituciones religiosas dieran ocasión a ejercicios mas bien frívolos. Jacques Ozanam (1640-1717), por ejemplo, nos dejó unas *Récréations mathématiques et physiques* (1694) en las que los cálculos no tienen ya gran cosa en común con los de Cauchy. Se trataba de un matemático profesional que con anterioridad había sido destinado al estado eclesiástico (y que ingresó en la Académie des sciences en 1701). Con el fin de realizar ejercicios de combinatoria, recurría a los doce apóstoles y a la frase de Cristo sobre «los primeros que serán los últimos». Peor aún, explicaba cómo deben actuar las religiosas para recibir a cuatro hombres por la noche sin que se entere la superiora... Las ocho celdas, explica Ozanam, están dispuestas en forma de cuadrado y en total hay veinticuatro religiosas. Si los controles de la superiora se efectúan contando a los presentes *por filas*, las religiosas pueden conseguir engañarla distribuyéndose adecuadamente en las celdas. Se trata de un ardid matemáticamente elemental; pero también hay que darse cuenta de que la ciencia de los números, en esta ocasión, no lleva a Dios sino más bien al Diablo. Y ello nos servirá de transición para abordar un problema de fondo suscitado por dos teólogos, Bossuet y Fénélon.

«Los encantos diabólicos de la geometría»

Bossuet no tenía mucho aprecio por las matemáticas. Y Fénélon se mostraba todavía más severo, llegando a pedir a un joven cristiano *«que no se dejara embrujar por los encantos diabólicos de la geometría, que apagarían en él el espíritu de la gracia».*[12] Así pues, no todos los defensores de la fe fueron adeptos del platonismo cristiano, admiradores incondicionales de las matemáticas. Según Bossuet, como recuerda d'Alembert en un elogio académico, no había que «despejar a los dogmas de la fe de su envoltura misteriosa». Las pretendidas pruebas matemáticas eran tan sólo «tentativas vanas para iluminar con las escasas luces de la razón esta santa oscuridad».

Se criticaba así, por ejemplo, al piadoso matemático francés Pierre Varignon (1654-1722), famoso por sus contribuciones al cálculo, infinitesimal y a la dinámica. ¿No pretendía este autor demostrar el dogma de la presencia real mediante una sucesión de teoremas? (Recordemos que este dogma consiste en afirmar que el cuerpo y la sangre de Cristo están realmente presentes durante el sacrificio de la misa bajo la apariencia del pan y del vino.) Según Bossuet, era igualmente ridículo formular hipótesis aventuradas para explicar la presencia física de Dios en varios lugares a la vez. La explicación «científica» que daban ciertos teólogos se resume así: el cuerpo de Cristo tendría *«una velocidad infinitamente mayor que el corcel más rápido, de manera que en el transcurso de un solo segundo podría dirigirse a todos los lugares del mundo donde la consagración exigiría su presencia.»*[12] Para Bossuet, más valía abandonar estas explicaciones irrisorias y admitir la decisión del concilio de Trento (que se desarrolló en tres sesiones entre 1545 y 1563): la presencia del hijo de Dios en la eucaristía es «incomprensible».

Pero como hemos observado, este punto de vista no se impuso a todos los creyentes. Durante mucho tiempo, el mito de un «Dios geómetra» fascinó a ciertos espíritus. El poeta alemán Novalis (1772-1801) lamentaba, por ejemplo, que «la matemática auténtica» tuviera su patria en Oriente y que hubiera «degenerado» en Europa. *«Tomas un libro de matemáticas sin un recogimiento respetuoso, no leerle como palabra de Dios, es no comprenderlo.»*[13]

Quizá convenga tener en cuenta estas cuestiones «teológicas» aparentemente alejadísimas de la pura racionalidad científica para abordar incluso la historia de las matemáticas modernas. Pues el matemático alemán Goorg Cantor (1854-1918), que indiscutiblemente cumplió, un papel de primer orden por su teoría de conjuntos y su definición de los números transfinitos, creía discernir una evidente relación entre las matemáticas, de una parte, y la metafísica y la teología, de otra. En el contexto cultural que acaba de ser evocado, esta convicción era fácilmente explicable. Si Dios era el único ser con la cualidad del infinito actual, toda especulación sobre lo transfinito llevaba consigo importantes consecuencias... Esto ayuda a comprender por qué solicitó Cantor de los teólogos y del Papa un juicio favorable sobre los extraños objetos matemáticos que había creado. Por extravagantes que quepa considerarlas, las utilizaciones teológicas de la «reina de las ciencias» constituyen una realidad cultural que, hace todavía poco, influían en un buen número de espíritus.

Pierre Thuillier.

(10) Misma obra, pp. 1270-1272.
(11) G. Maupin obra citada, p. 159.
(12) Misma obra, p. 161.
(13) Novalis, *Oeuvres complètes,* tomo II, *Les fragments,* Gallimard 1975, p. 382.

Arbor
Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, enero de 1987
Ochenta años de Ciencia en España

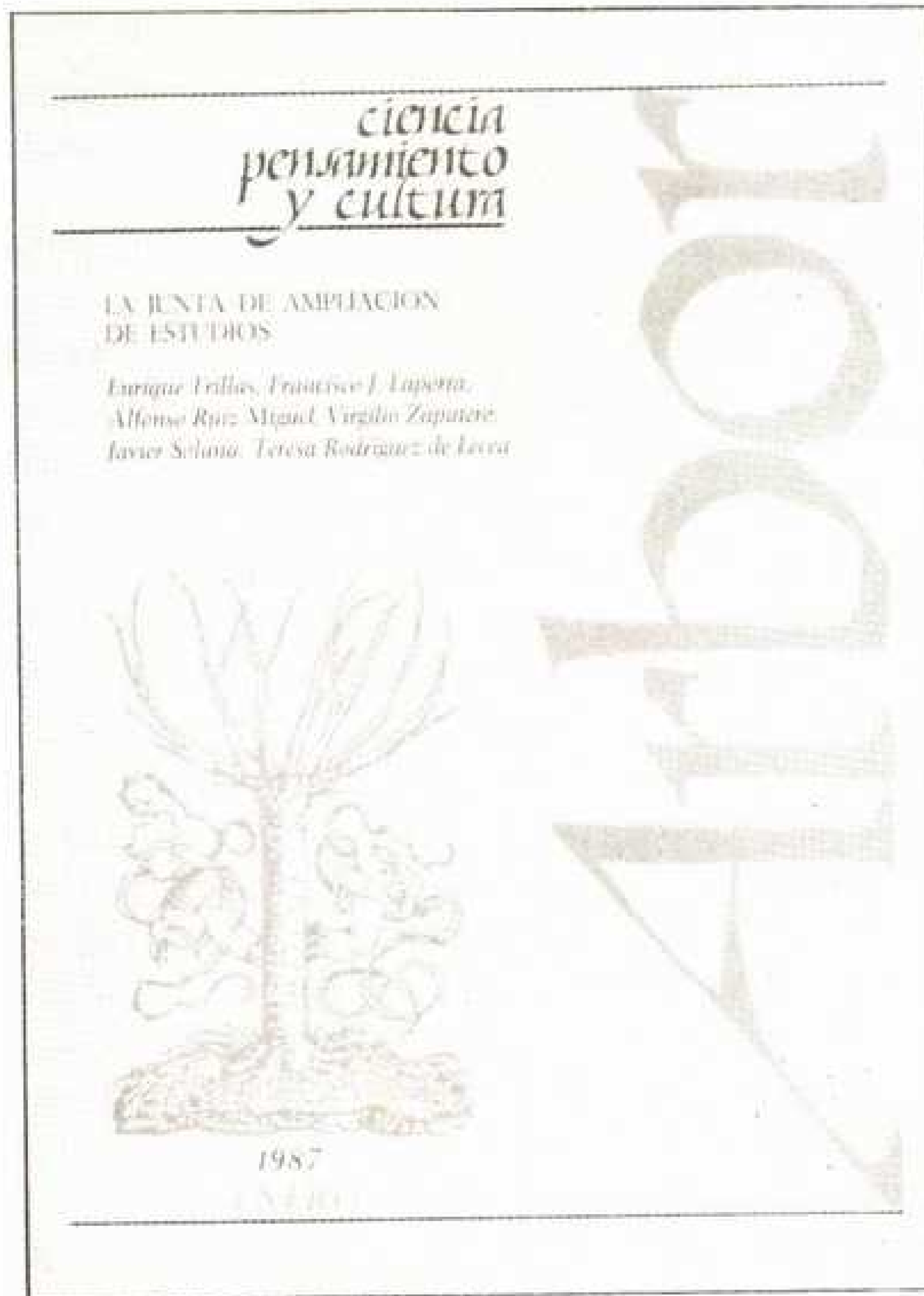
El 15 de enero de 1907 se constituyó en Madrid, en el Ministerio de Instrucción Pública y Bellas Artes, la Junta para Ampliación de Estudios e Investigaciones Científicas. Ochenta años después, la institución que presido quiere recordar esta fecha –arranque de una primera etapa en la modernización científica e intelectual de España– desarrollando a lo largo de 1987 un programa de actividades en homenaje a la Junta y a sus creadores y, muy especialmente, a lo que ella significó y ellos significaron para la reciente historia española.

Quienes en la actualidad formamos parte del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, junto a otros profesionales dedicados a la investigación en las universidades y en el sector industrial, nos encontramos empeñados en una labor que viene a ser la consecuencia de la desarrollada por aquellos pioneros. En esta nueva etapa (acorde con la actual evolución industrial) no se trata ya de introducir los estudios superiores y la investigación en España, sino de consolidarla en nuestro modelo de desarrollo, hoy en trance de convertirse en un auténtico Sistema Ciencia-Tecnología-Industria.

Sin embargo, en este proceso de consolidación siguen vigentes algunos de los principales objetivos que se trazaron los hombres de la Junta: la innovación científico-tecnológica no es posible sin la modernización intelectual; sin el diálogo interdisciplinar que surge de la libertad y del pluralismo; sin la cooperación europea. Es todavía necesario derrumbar importantes barreras en la persecución de estos objetivos. Para ello se requiere, como condición necesaria, que esta actividad innovadora sea conocida y apoyada por la sociedad, para lo que es necesario que la innovación llegue a integrarse en el lenguaje y horizonte de una mayoría de españoles, instalándose, por medio de la educación y la cultura, en su vida cotidiana. Ésta era sin duda una preocupación constante de quienes alentaron el proyecto científico de la JAE, y hoy es la nuestra; aunar la investigación fundamental con una perpetua agitación de las conciencias de los españoles, para hacerles conscientes tanto de la importancia del desarrollo científico y tecnológico como de la necesidad de que tal desarrollo sea puesto al servicio de todos los ciudadanos.

Propósitos semejantes fueron enunciados por Alberto Jiménez Fraud, hace ya muchos años, al señalar la necesidad que la investigación tenía que mantener un estrecho contacto con la sociedad que la rodea, sentirse sostenida por ella, atender a sus intereses y necesidades, no estar, en fin, perdida en un vacío social, y absorta en la contemplación de la entelequia académica.

En este espíritu, el Consejo intenta honrar la memoria de la Junta. Si deseamos considerarnos sus herederos, no es sólo por la fuerza de una Ley de 1939 que atribuía al recién creado Consejo los bienes y propiedades de la disuelta Junta, y que no podía, desde luego, atribuirle a sus hombres; sino en razón a un quehacer como en el que hoy estamos empeñados, que es deudor en tantos aspectos de cuanto se realizó entonces. En este horizonte debe entenderse el conjunto de iniciativas emprendidas, y cuyo objetivo ha sido, y es, evidenciar las raíces que esa



irrenunciable tradición intelectual tiene en el actual proyecto del CSIC. Entre ellas, la devolución de su viejo nombre a la *Residencia de Estudiantes*, y con él, su tradición más viva: que la *Residencia* sea cada vez más un espacio abierto, capaz de acoger a los investigadores, españoles y extranjeros y al núcleo impulsor de la actividad de extensión científica del CSIC. Así fue proyectado por Alberto Jiménez Fraud y José Castillejo. Al fin y al cabo, «estudiante» es concepto que expresa la afición al conocimiento; y un buen investigador nunca deja de estudiar. Lo importante es que ahora, como entonces, la *Residencia* sea una ventana abierta al quehacer científico e intelectual en todo el mundo singularmente en esa Europa a la que nos hemos integrado plenamente en el pasado 1986. Que en ella pueda realizarse un debate permanente, y lo más amplio posible, entre quienes hacen la cultura y quienes hacen la investigación en este país, convirtiéndose en caja de resonancia de nuestro proyecto de innovación ante la sociedad española, de acuerdo, además, con el lema del gran lógico polaco Jan Lukasiewicz «he declarado una guerra espiritual contra toda coerción que restrinja la libre actividad creativa de los seres humanos».

En esta dirección, las actividades de la *Residencia* no han hecho sino comenzar, pero lo significativo es el carácter tan explícito y rotundo con que lo han hecho. Así se ha acogido (mediante un convenio público) el archivo de García Lorca: las obras de acondicionamiento están a punto de iniciarse, en uno de los pabellones gemelos. Entre tanto, se han habilitado un par de despachos para los trabajos de catalogación de estos fondos, a cargo de la Fundación García Lorca, de la que el CSIC ha pasado a formar parte como patrono. Por lo demás, se ha devuelto el salón «del piano» a sus antiguas proporciones, más aptas para actos culturales y conciertos, que ya se han venido celebrando. Otro antiguo amigo de la *Residencia* ha sido recientemente objeto de una exposición: el jardinero y pintor Javier de Winthuyssen, del que acabamos de clausurar una espléndida retrospectiva de sus diseños, en nuestro Jardín Botánico de Madrid.

Pero si es verdad que quienes actualmente formamos parte del CSIC nos sentimos honrados por el legado de la JAE, tampoco es menos cierto que la sucesión de ambas instituciones no se hizo sin terrible trauma, que en esta hora, cuando parece definitivamente superado, no queremos ignorar. De este modo se ha fomentado el estudio de ambas instituciones para que la sociedad española conozca la tarea iniciada entonces y también las vicisitudes y dificultades por las que ha atravesado desde aquellas fechas esta empresa modernizadora.

Entre los estudios que han visto la luz recientemente, fruto de esta voluntad de conocer nuestro inmediato pasado, debe citarse la breve historia de la *Residencia*, escrita por Margarita Sáenz de la Calzada. Y dos volúmenes testimoniales (ambos con abundantes elementos autobiográficos) sobre Cajal y su labor en la JAE. El primero acaba de publicarse, y fue escrito por don Pío del Río Hortega: *El maestro y yo*, prologado por don Severo Ochoa y anotado por Alberto Insúa; el segundo, todavía en prensa, una nueva biografía de Cajal, debida a su discípula y colaboradora Enriqueta Lewy. Junto a todo ello, acaba de adjudicarse una beca post-doctoral, convocada en homenaje a José Castillejo, y cuyo objeto es la realización de investigaciones en torno a la Junta. El Consejo tiene el propósito de seguir convocando las «becas Castillejo», que podrían desembocar en un programa de investigación de más alcance.

Por tanto, el año se inicia con este número de *Arbor* y concluirá con un Simposio Internacional, en el que especialistas en historia de la ciencia abordarán el estado de la cuestión no sólo por lo que respecta a la historia de la Junta, sino también a la del CSIC.

A lo largo de 1987 esperamos que vean la luz otras publicaciones: Sobre José Moreno Villa –cuyo centenario celebraremos la primavera próxima, con una gran exposición organizada por el Ministerio de Cultura, en la que estamos colaborando– sobre Alberto Jiménez Fraud –del que nos prepara un volumen de escritos su hija Natalia–, y, desde luego, de la figura principal de José Castillejo, cuya biografía esperamos ver muy pronto. Pero también se proyecta publicar este mismo año la colección completa, en edición facsímil, de la revista «Residencia»; la edición conjunta, con la Comunidad Autónoma de Madrid (y dentro del primer centenario de nuestro Museo Nacional de Ciencias Naturales) de una colección del XVIII de láminas originales de insectos, así como la coedición con Radio Nacional de España del Archivo de la Palabra, valiosísima grabación de músicas populares, hechas por el Centro de Estudios Históricos, con el apoyo de la JAE.

Este denso programa de publicaciones y ediciones no es la única línea de actividades en homenaje a la Junta. Tampoco podía faltar el recuerdo de su misión pedagógica, que si bien es ajena a la labor del CSIC, está directamente conectada con un propósito que es cada vez más el nuestro: la sensibilización de toda la sociedad en torno a los objetivos básicos de la nueva Ley para el Fomento de la Investigación Científica y el Desarrollo Tecnológico. Es indudable que el amor por la investigación comienza en los años escolares. Por ello el CSIC va a convocar en la próxima primavera su Primer Premio de Investigaciones en el Aula, dirigido a todos los estudiantes de enseñanza general básica y bachillerato.

Esta línea de actividad se relaciona con otra, también vinculada a la celebración del centenario del Museo Nacional de Ciencias Naturales (1887-1987). Y es la creación en la finca de «El Ventorrillo», tan querida por

don Francisco Giner y los suyos, de una Escuela de Estudios de la Naturaleza con la colaboración de los Ayuntamientos de Navacerrada y Cercedilla, y dirigida por el equipo pedagógico del Museo. Junto a esta labor de iniciación a la naturaleza y senderismo está en estudio la promoción de una línea de investigaciones sobre historia intelectual y geografía, realizada por un equipo de profesores de la Universidad Autónoma de Madrid.

Tampoco podía faltar en la memoria de la Junta una especial consideración al entorno arquitectónico y urbanístico de la Colina de los Chopos, que es en sí misma un emblema de aquel horizonte intelectual y estético y de lo que se quiso hacer con él. Para ello se ha encargado a un conocido estudio de arquitectos un proyecto de este espacio urbano, que nos permita el próximo otoño hacer una propuesta integrada de reordenación y adecuación de todos los edificios y espacios de la Colina.

Todas estas realizaciones y proyectos (algunos de los cuales he preferido omitir, en la esperanza de que tan prolija enumeración resulta incompleta en diciembre de 1987) son apenas los primeros pasos de una obra más lenta y duradera: que cuantos hacemos en esta colina de los Chopos, desde la que ahora escribo –y que ojalá que las futuras generaciones vean como Colina de la Ciencia–, y, sobre todo, que la labor todavía poco conocida de varios miles de investigadores en toda España llegue a ser asumida por los ciudadanos y contribuya decisivamente a la innovación científico-tecnológica.

Ésta es la única celebración que hubieran aceptado quienes hicieron posible el legado benemérito de la Junta: un conjunto de labores y esperanzas, como las que acabo de exponer. Con ellas el Consejo y desde tan nobles y firmes raíces se prepara, escudriñando atentamente los signos de los tiempos para la nueva sociedad de los años noventa. ■

Enrique Trillas.
Presidente del CSIC

Eduardo Averbuj
Con el cielo en el bolsillo. La Astronomía a través de la Historia
Madrid, 1986. Grupo cultural Zero
247 pp.



El Grupo cultural Zero se ha propuesto contribuir a la renovación pedagógica emprendida hace años por el Ministerio de Educación y Ciencia –de la que todavía hay más confusión que seguridades– elaborando «materiales apropiados para desarrollar un camino marcado por las alternativas educativas». A esta intención responde el PROYECTO DIDÁCTICO QUIRÓN, del que van publicados media docena de títulos pensados para los niveles de Preescolar, Educaciones Básica y Media, COU y Escuelas de Adultos. Vayan por delante mis mejores deseos para quienes se han atrevido con asunto tan complejo y necesario.

El libro que paso a reseñar pertenece a este Proyecto. Su autor, Eduardo Averbuj –a quien conocí con una escobilla en una mano y, en la otra, un huevo, para hacernos pensar sobre no recuerdo qué fenómeno físico– queda perfectamente retratado en el «Prólogo para un autor» que hace Fabricio Caivano, quien no duda –yo tampoco– que nuestro autor es «la materialización de algunos ectoplasmas del pasado». Caivano ha preferido hablar de Averbuj, yo hablaré de su libro.

La Astronomía ha sido curiosamente la gran olvidada de los Planes de Estudio en los niveles primario y secundario. Y me extraño porque, aparte de ser una ciencia tan antigua y fecunda, generadora de contenidos para las ciencias exactas y físicas, es apropiada para fomentar actividades al alcance de los niños y adolescentes. Cuando no, para avivar la capacidad de ensoñación y asombro tan necesarias en cualquier actividad creativa y tan maltratadas por la rutina escolar. Fue asignatura obligada en centros que tenían algo que ver con la navegación (Instituto de Gijón, creado por Jovellanos; Instituto de Ingenieros Cosmógrafos, creado por Godoy, entre otros) y en los Observatorios Astronómicos para los estudios universitarios cuando las Facultades de Ciencias no existían como tales. Al crearse los Institutos de 2.ª Enseñanza (1845), la 2.ª Enseñanza Superior impartida hasta la ley de Moyano (1857) en la Facultad de Filosofía tenía la Astronomía física como asignatura siguiendo los textos de Biot y de Herschell. En la primera enseñanza la Astronomía entraba ocasionalmente a través de algún libro de lectura, entre los que cabe destacar: *La Astronomía al alcance de todos. Conversaciones entre un viejo y un niño* (1873) de Esteban Hernández y *El cielo. Nociones de Astronomía popular dispuesta para lectura en las Escuelas,* de Victoriano F. Ascarza, reeditado varias veces, hasta 1935, por la vinculación de su autor con la Junta para Ampliación de Estudios y el Instituto Escuela. La Astronomía se fue convirtiendo cada vez más en un estudio muy específico, e incluso perdió su sitio en la segunda enseñanza por el auge que durante el siglo XIX y primer tercio del XX adquirió la Meteorología en las clases de Física.

Últimamente se están publicando libros de Astronomía para distintos niveles, quizás al amparo de la ciencia ficción, de series televisivas tipo Cosmos y del desarrollo de la Astronáutica. En cualquier caso, ahí están y bienvenidos sean porque son necesarios. No obstante, entre estos libros fundamentados en lo astronómico propiamente dicho, no incluyo el libro de Averbuj, porque, sencillamente, es diferente, como era de esperar en un sonámbulo como él. Aparte del título, indicativo del carácter distendido que tiene el libro, son ilustrativos en el mismo sentido, los encabezamientos de cada uno de los XXVIII capítulos. Éstos son algunos: El hombre prehistórico: la mirada asombrada; Pitágoras: está prohibido comer habas; Aristóteles: el mundo de arriba y el mundo de abajo; Artarco: una bomba de tiempo; en Roma se miraba al cielo; Copérnico, un subversivo; Galileo: el gran ojo de los hombres; Newton: las ideas y los gatos; Leverrier: un planeta en el lápiz; Einstein: con la imaginación al poder.

El libro es una relato científico, escrito en un lenguaje sencillo, ameno y sugestivo; es un libro muy humano, al alcance de cualquiera sin que sea necesaria una preparación previa en ningún sentido: basta sólo saber leer para entrar en él y disfrutarlo. Facilitan su lectura y asimilación del contenido las pequeñas dosis en que se subdividen los capítulos. Por ejemplo, el capítulo «Gionardo Bruno: un universo abierto» que abarca cuatro páginas, como es casi norma para el resto, está desarrollado en los siguientes episodios: los antecedentes de un crimen, Bruno y las estrellas, El espacio infinito y en movimiento, Las ideas no mueren. De manera que, desde el punto de vista docente, queda muy controlada la fatiga lectora, inconveniente prioritario a combatir cuando se pretende del alumno un rendimiento óptimo. Siguiendo con el criterio docente hay que destacar la claridad de las ilustraciones sobre comentarios de cuestiones sacadas de la observación directa, sin instrumentos, del universo y de los objetos: identificación de constelaciones, posición y movimiento relativos, efecto de paralaje, medida de distancias astronómicas, elaboración de calendarios, modelos planetarios, etc. Otro aspecto a tener muy en cuenta y sobre el que debe insistirse en cualquier trabajo orientado a la formación científica en los niveles básico y medio, es el concepto de «modelo». En la pág. 212 –«Los modelos, o cómo acercarse a la realidad»– hace Averbuj un breve y suficiente comentario al respecto; queda claro el carácter transitorio de los modelos su sentido aproximativo a lo que pueda ser la realidad y su elaboración a base de leyes físicas y planteamientos matemáticos.

El propósito de validez docente se pretende conseguir a través de una orientación histórica abundante de noticias, generales, acontecimientos personales de los protagonistas y hechos propiamente científicos hábilmente combinados. Ante nosotros desfilan con cierta intimidad, Tales, Pitágoras, Platón, Copérnico, Galileo, Kepler, Newton, Laplace, Leverrier, Einstein y otros a quienes debemos la gracia de andar «con el cielo en el bolsillo».

El criterio adoptado por Averbuj para el desarrollo histórico corresponde al procedimiento que se ha dado en llamar historia externa, en el que se tiene en cuenta, además del contenido específico, el entorno social en que la ciencia se desenvuelve. Porque la actividad científica, por muy aislada que se pretenda considerar, es una actividad afectada por la política, la economía, la religión... incluso por la psicología del científico y sus preferencias. No es, por tanto, irrelevante para profundizar en los saberes científicos conocer cómo los sacerdotes egipcios se las arreglaban para acumular datos del cielo, desconocidos para los demás, con tal de agigantar su poder; cómo Kepler padeció de desarmonía matrimonial mientras encontraba la armonía del inasequible universo; o

cómo Laplace se atrevió a contestarle a Napoleón que no tuvo necesidad de recurrir a la «hipótesis» de Dios para explicarse el origen del Sistema Solar. Porque como puede leerse en la introducción –«Una cálida historia»– los científicos son «seres concretos, que usan camisas de cuello arrugado, que transpiran en verano, que comen (a veces) con las manos, que se enojan con algún vecino, que pierden una muela en el dentista». Personajes de los que, en mi opinión, se ha hecho más hagiografía que biografía auténtica, cuando en realidad y para bien de todos también «vivieron, amaron y sufrieron». ■

Antonio Moreno.

Anthony Hallam
Grandes controversias Geológicas
180 pp., Editorial Labor, Barcelona

La comunidad científica internacional que se dedica a la paleontología conoce sobradamente al profesor Anthony Hallam, profesor de Geología de la Universidad de Birminham. Sus trabajos más importantes («Jurassic Environments», 1975; «Atlas of Paleobiogeography», 1973; «Patterns of Evolution», 1977) no han sido traducidos al castellano. El lector español sólo dispone de un libro traducido («De la Deriva de los continentes a la Tectónica de Placas», Labor, 1976) y algunos artículos en revistas de divulgación científica.

En exquisita traducción de los profesores José M.ª Fontboté y Montserrat Rubió aparece ahora la versión castellana de *Grandes Controversias Geológicas,* publicada en 1983. Anthony Hallam nos presenta en esta obra un recuento descriptivo de cinco grandes controversias científicas en el campo de la Geología. Controversias que hicieron correr la tinta apasionada de los geólogos y que contribuyeron de modo decisivo a la consolidación del paradigma actual de las ciencias de la Tierra. Escribía Bacon hace muchos siglos que la luz surge de la discusión y no de la confusión. Qué duda cabe que el hilo de las controversias colaboró a la claridad.

Hallam elige cinco controversias geológicas: la de los neptunistas frente a vulcanistas y plutonistas, de los catastrofistas frente a los uniformistas, de la edad glacial, de la edad de la Tierra y de la deriva de los continentes. Dos objetivos pretende el autor con esta obra: por un lado, resaltar las raíces históricas del paradigma geológico actual; por otro, dar a conocer a una audiencia más amplia algunos de los ejemplos fascinantes de la historia intelectual.

Una gran labor de este libro reside en la abundancia de citas. Para algunos lectores puede resultar farragoso, pero los interesados en la historia de las ciencias geológicas encontrarán pequeñas joyas literarias, porque el estilo de los escritos geológicos de los primeros tiempos era frecuentemente más elocuente y la fraseología más escogida de lo que es costumbre hoy día.

Tal vez podría haberse completado el libro con una bibliografía final, más iluminadora que un simple índice alfabético. Pero ello no resta calidad e interés a este libro. ■

Leandro Sequeiros.

El Libro de la miel
Fondo de Cultura Económica
México, 1985, 289 pp.

A. Bonet, J. Rita y M. T. Sebastià
La flora mel·lifera de la circumscripciò de Barcelona
Estudis i Monografies núm. 7. Diputació de Barcelona
Barcelona 1985, 107 pp.

En torno a la fascinante vida de las abejas se ha escrito una infinidad de libros y estudios: sobre su organización social, su comportamiento, las pautas de comunicación entre los individuos de la colonia, su infatigable trabajo recolector y polinizador, etc. Sin embargo los dos libros que comentaremos no se centran directamente sobre las abejas, aunque evidentemente se deben a estos insectos, sino que versan sobre la miel bajo todos sus aspectos y sobre las plantas que abastecen de néctar a las abejas y llenan los panales de colmenas.

El libro de Eva Crane es una recopilación de temas que partiendo de la miel hablan de las abejas, de las plantas melíferas, de la composición de la miel, sus características, clases, etc., de la utilidad de la miel, de la historia de la relación entre las abejas y la humanidad a través de la miel, etc. Es un libro variado en el que conviven las recetas de cocina, las fórmulas antiguas de cosméticos, bálsamos o productos alcohólicos en los que se emplea la miel, con la descripción de la bioquímica de las reacciones que intervienen en la formación de miel desde el néctar de las flores, hasta el panal, pasando por el buche de la abeja o los estudios antropológicos e históricos del paso de la expoliación de las colmenas salvajes a la cuasidomesticación de la abeja, así como de las creencias que los distintos pueblos de la Tierra han elaborado alrededor de la abejas y del dulce líquido que almacenan.

«El libro de la miel» pasa de largo sobre la vida de las abejas y sólo se detiene en su actividad referente a la recolección del néctar y su transformación en miel gracias a las enzimas que incorporan y que empiezan a actuar en la bolsa melífera y finalizan su acción en el panal sellado, y la concentración del líquido mediante la evaporación del agua sobrante. Sigue una recopilación de las plantas melíferas más importantes, especialmente de la región holártica, con la secuencia de floración a lo largo del año, y de otras fuentes de miel, como los mielatos o ligamazas, que son secreciones azucaradas producidas por el ataque de algunos parásitos de plantas.

La composición química de la miel o de las distintas clases de mieles ocupa otro capítulo, en el que se describen esta mezcla sobresaturada de azúcares en agua y el gran número de sustancias que le dan el sabor y el olor característicos de cada tipo de miel. La distinta proporción de azúcares y el porcentaje de agua determinan la mayoría de las propiedades físicas de la miel, con las que se puede determinar en buena parte el origen de una miel. Sin embargo la determinación más exacta de las plantas que proporcionaron el néctar se basa en el examen microscópico de los granos de polen que siempre están presentes en la miel.

Después de estos capítulos dedicados a los aspectos biológicos y bioquímicos de la miel empiezan los que se refieren a la dulce



relación entre el hombre y la miel y la no tan dulce entre el hombre y las abejas. Por una parte con los capítulos dedicados a su empleo en la cocina, con muchas recetas de todo el mundo, a la obtención de preparados alcohólicos, como el hidromiel, mediante la fermentación de miel diluida, y a los preparados farmacéuticos o cosméticos. Por otra, con una interesante recopilación antropológica de la exploración de los panales por numerosos mamíferos y, sin solución de continuidad, por el hombre del que ya desde tiempos prehistóricos quedan testimonios gráficos de su interés por panales salvajes fue la práctica habitual para proveerse de miel hasta muy recientemente. Primero simplemente se protegían los árboles en los que las abejas construían su colmena, los cuales formaban parte importante de las propiedades; después se instalaron los enjambres en pequeñas colmenas artificiales, de madera,

Estudis i Monografies 7

A. Bonet, J. Rita i M.ª T. Sebastià

LA FLORA MEL·LÍFERA DE LA CIRCUMSCRIPCIÓ DE BARCELONA

Diputació de Barcelona

paja, corcho, etc. En cualquier caso para recuperar la cosecha de miel había que matar a la productiva colonia de abejas. Sólo desde la segunda mitad del siglo XIX, con la invención de las colmenas de marcos móviles, empezó la moderna apicultura y las abejas dejaron de ser sacrificadas cada vez que extraía la miel.

Otro aspecto interesante del presente libro es el de las numerosas creencias sobre la miel y las abejas en las distintas culturas y épocas. Una de las razones por la que las abejas, y sobre todo, la miel fueron consideradas por muchas culturas antiguas como divinidades o productos de los dioses, se debe probablemente a que el hidromiel, líquido alcohólico fabricado con miel diluida, fue el primer producto embriagante probado por el hombre, lo que confería a la miel propiedades mágicas.

El segundo libro es aún más específico. Se trata básicamente de una descripción sistemática de las plantas melíferas más importantes de la provincia de Barcelona. Este libro es el resultado de un reciente trabajo de campo sobre la distribución de las distintas plantas de interés, así como de sus períodos de floración y las comunidades a las que pertenece cada planta, así como la secuencia de floración de las plantas componentes de la comunidad vegetal. Evidentemente se trata de plantas y comunidades básicamente mediterráneas, abundantes en las comarcas barcelonesas y de amplia ditribución en todo el mediterráneo, por lo que las descripciones y las tablas de floración pueden ser útiles para otras zonas de clima similar.

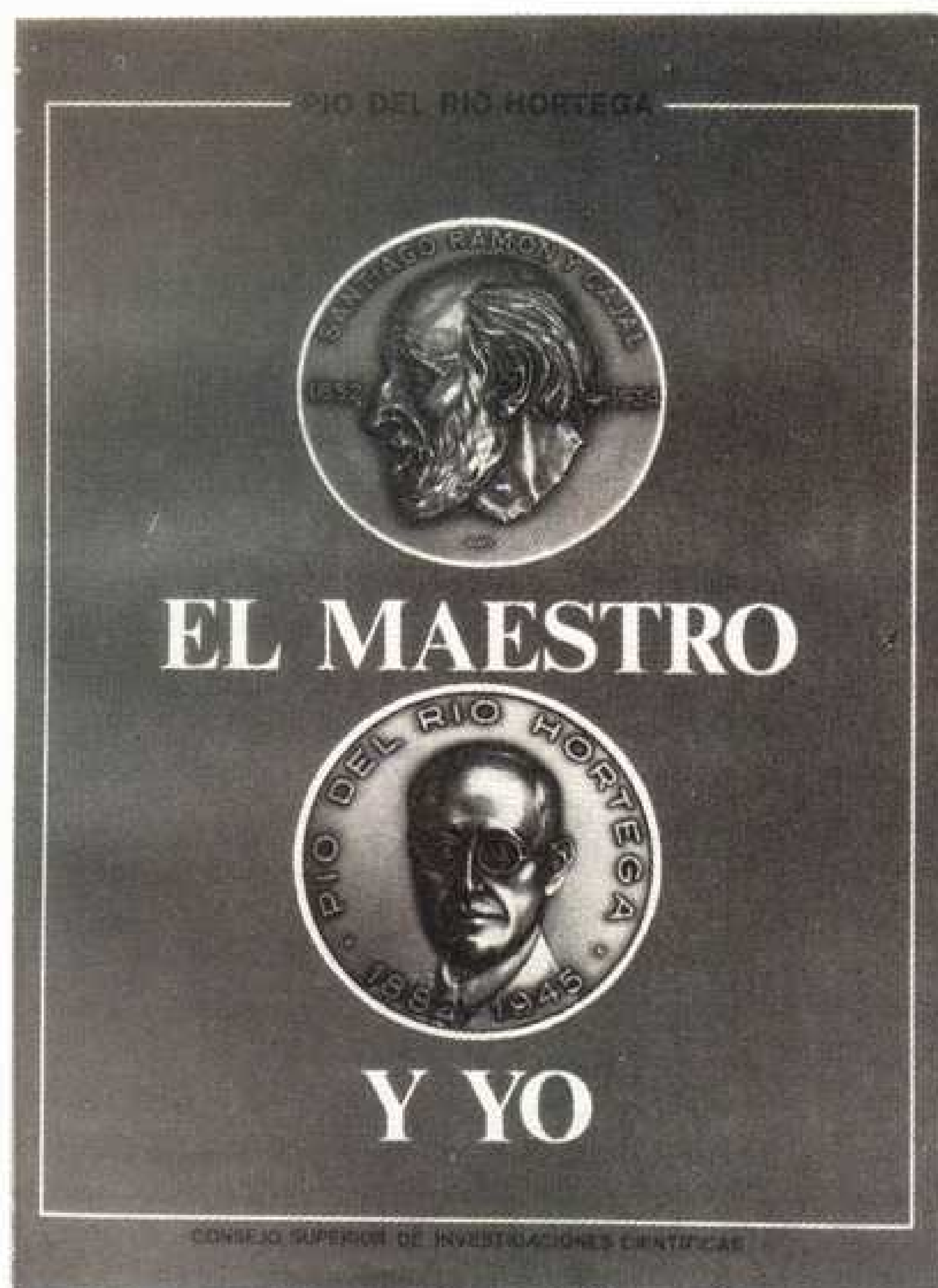
Para cada especie, tanto de las floraciones principales como de las secundarias, y de las productoras de mielatos, se da una descripción de la planta, su ecología y distribución, la fenología floral, su interés apícola y la flora acompañante, además de una fotografía en color, un mapa de distribución y una tabla de flora acompañante en distintas poblaciones.

También se dedica un capítulo a la descripción de las comunidades vegetales más extensas en estas comarcas y de su importancia apícola y finalmente, para cada una de las comarcas, se establece un diagrama fenológico en el que se representa los períodos de floración a lo largo del año de las principales plantas melíferas, tanto espontáneas como cultivadas. ■

Jaume Serrasolsas.

Pío del Río Hortega
El Maestro y yo
Edición a cargo de Alberto Sánchez Álvarez-Insua. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, 1986.

En el verano de 1940, comenzada ya la segunda guerra mundial, D. Pío del Río Hortega, que residía y trabajaba en Oxford se trasladó a Buenos Aires, invitado por el profesor Pollack de aquella Universidad a continuar en su laboratorio la ingente labor investigadora y docente a la que había dedicado su vida. Años más tarde, después del fallecimiento de D. Pío y del mismo profesor Pollack, llegó a oídos de D. García Durán Muñoz, casado con una nieta de Cajal, que había en Buenos Aires unos documentos relativos a del Río Hortega y Cajal. Durán



Muñoz se encaminó a Buenos Aires en donde se enteró que los documentos en cuestión estaban en posesión de la señora viuda de Pollack quien hizo entrega de los mismos a Durán para su salvaguarda y ulterior disposición. A su regreso a España Durán depositó todos los documentos originales en la Biblioteca Nacional (Centro Nacional de Tesoro Documental y Bibliográfico del Ministerio de Cultura) y, algo más tarde, puso gentilmente a mi disposición fotocopias de los mismos para su eventual publicación. El material conservado por la señora viuda de Pollack, todo él inédito, incluye: 1. El texto mecanografiado (pero inconcluso) de un ensayo de D. Pío del Río Hortega titulado «El Maestro y Yo». 2 Una breve biografía de D. Pío por su fraternal amigo y compañero de exilio Nicolás Gómez del Moral. 3. Once cartas manuscritas de Cajal a del Río Hortega. 4. Cartas mecanografiadas de Cajal a del Río Hortega. 5. Cuatro cartas manuscritas de del Río Hortega a Cajal, y 6. Algunos otros documentos que se detallan en el índice. Este valiosísimo material histórico ve finalmente la luz gracias al interés y el esfuerzo de D. Enrique Trillas, Presidente del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, a quien quiero hacer constar aquí mi profundo agradecimiento por su inestimable ayuda. Tanto el Profesor Trillas como yo deseamos asimismo expresar nuestro agradecimiento a D. Luis del Río Hortega y demás familiares de D. Pío por su generosa autorización para la publicación de estos documentos. ■

Severo Ochoa.

M. Hildebrand et al.
Functional vertebrate morphology
430 p., Harvard University Press

Este libro, notable por su interés, su claridad y su presentación, ofrece un compendio bastante completo del estado actual de los resultados y de los conceptos en un campo de la biología marginado entre nosotros, el del estudio de los organismos considerados en una perspectiva estructural-funcional y evolutiva. Atestigua una clara renovación de la morfología funcional de los vertebrados, no sólo en Estados Unidos, sino también en los principales países específicamente desarrollados. Los dieciocho capítulos pueden agruparse en algunos temas: estructura y adaptaciones biomecánicas del esqueleto; modalidades de la locomoción; intercambios respiratorios; ecofisiología y metabolismo; captura, tratamiento y deglución de los alimentos; aparato visual y visión; aparato acústico lateral, audición y equilibrio. El conjunto proporciona por tanto un panorama bastante completo y moderno de grandes temas estructurofuncionales abordados en los vertebrados, pero es de lamentar, por ejemplo, la ausencia de un capítulo sobre el olfato y la gustación.

Por su nivel el libro se adapta bien a los 2.^{os} ciclos (e incluso a los 3.^{os}) y constituirá para los enseñantes (y estudiantes) una mina muy particularmente rica y atrayente de resultados modernos, presentados en forma fácilmente digerible. Además, el último capítulo, por F. Liem y D. Wake, constituye una notable reflexión general sobre las tendencias y los problemas actuales de la biología evolutiva, que integra de forma excelente, a nivel de conceptos, los capítulos especializados precedentes.

Para concluir, sería deseable que este excelente libro fuese leído y meditado, además de por su público natural, por todos los «expertos» y «decididores» que, en la dirección de las Universidades, del CNRS, de los ministerios o en otras partes, se comportan todavía como si los profesores de la biología molecular, por sí solos, convirtiesen en caducos para siempre, el estudio y el conocimiento de los seres vivos a otros niveles de integración y especialmente al del organismo. Ofrece, en efecto, el más mordaz desmentido de la intolerancia dogmática que con demasiada frecuencia se constata, por desgracia, en Francia a este respecto, demostrando hasta la evidencia hasta qué punto el estudio complementario de las estructuras y funciones a *todos* los niveles de integración en unas perspectivas evolutivas es indispensable para el desarrollo de una biología equilibrada, tanto si se trata de investigación, como de enseñanza o de aplicaciones. ■

P. Brun
La civilisation des champs d'urnes étude critique dans le Bassin parisien
88 p., Maison des sciences de l'homme

El autor estudia el paso de la edad de Bronce a la edad de Hierro en la Cuenca parisina y, a partir de los resultados obtenidos en esta región, los problemas generales que plantea este período en el oeste de Europa. Los conjuntos cerrados son analizados con mucho rigor y, para resolver las contradicciones entre sus propios resultados y las experiencias tradicionales el autor examina de nuevo todas las investigaciones de los últimos treinta años sobre las clasificaciones cronotipológicas. Puede entonces demostrar, de forma convincente, que no es necesario recurrir a grandes migraciones transeuropeas para explicar las mutaciones importantes de esta época. He aquí una tesis que por supuesto será discutida, pero que tiene el mérito poco frecuente de trastornar las ideas recibidas y de hacer renacer el espíritu de investigación. ■

D.E.Arnold
Ceramic theory and cultural process
268 p., Cambridge University Press

Por qué algunas sociedades fabrican alfarería y otras no? ¿Por qué esta fabricación es tan pronto puramente doméstica como especializada y dirigida hacia un mercado exterior? ¿Por qué en un lugar alfareras, en otro alfareros? Tales son las ambiciosas preguntas a las que intenta responder, por primera vez sin duda de forma sistemática, el antropólogo D. Arnold. Con este fin examina sucesivamente el efecto, positivo o negativo, de diversos factores determinantes tales como los recursos de materias primas, el clima local, la inserción de la producción de cerámica en las actividades cotidianas, el estado sedentario, las relaciones del grupo con su tierra agrícola. Otorga en efecto una gran importancia a factores «externos», especialmente ecológicos y económicos. Estos últimos, en efecto, se han revelado determinantes en América del Sur, en las regiones directamente estudiadas por el autor; pero si su análisis se refiere en principio al mundo entero (es decir a las regiones que han dado lugar a publicaciones en inglés...!), se duda de su alcance universal y sería deseable ver este tipo de estudios aplicados a África por ejemplo. En la espera, este libro una mina de informaciones y de ideas estimulantes. A pesar de un embalaje teórico a veces ingenuo, se trata de una contribución muy importante a los estudios de alfarería tradicional y la aparición de un artesanado especializado. ■

D. Norman y J. Sibbick
The illustrated encyclopaedia of dinosaurs
208 p., Salamander Book

Se empieza el libro creyendo que ya se había dicho todo sobre los dinosaurios y se descubre en unas 200 páginas magníficamente ilustradas que no se sabía nada. Tras una breve introducción que sitúa a estos animales fantásticos en la espiral de la vida, D. Norman nos iniciará en el estudio de este grupo que fascina desde hace décadas tanto al gran público como a los propios científicos. Vamos por tanto a desenterrarlos, asistiremos luego al montaje de sus esqueletos en los museos y a continuación seremos instruidos en el arte de un estudio anatómico: ya que hay que cubrir de músculos y de nervios a estos grandes animales, para comprender entonces su fisiología y hasta algunos aspectos de su comportamiento. El texto es sencillo, los dibujos numerosos y todo grupo desfilará ante nosotros. Se presentan siempre motivos vegetales entre los que retoza el tropel de dinosaurios: combates singulares, actitudes y comparaciones con nuestros mamíferos actuales nos permiten penetrar en estos mundos del secundario. Referencias precisas y mapas de distribución geográfica y cronológica aparecen donde hacen falta y cuando hacen falta. El autor, en los últimos capítulos, evoca algunas de las más célebres controversias originadas en la comunidad científica sobre este tema (¿tenían los dinosaurios sangre caliente? ¿Provocó un meteorito su desaparición?) Hay que felicitar al autor y al ilustrador. ¡Cuántas vocaciones dinosáuricas van a surgir gracias a este libro...! ■

K.J. Edwards y W. Warren (eds.)
The quaternary history of Ireland
382 p., Academic Press

He ahí una obra de síntesis que era realmente necesaria. Sin detenerse en épocas anteriores, trata principalmente de la historia del Cuaternario reciente, examinado de manera muy completa a través del estudio de una serie de temas. El riesgo de una yuxtaposición de aportaciones inconexas ha sabido evitarse, y cada capítulo está estructurado siguiendo un mismo plan (etapas del conocimiento, presentación explícita de los hechos ya sabidos y de aquellos otros controvertidos o ignorados, conclusión sobre el balance y la problemática de las investigaciones). El resultado de todo ello es un conjunto muy coherente. Por otra parte, los «editores» no han intentado disimular algunas divergencias de interpretación sobre puntos importantes (cronología, impacto del hombre). Se presta una especial atención a los aspectos aplicados de los estudios cuaternarios, olvidados con demasiada frecuencia. ■

R.T. Bird
Bones for Barnum Brown. Adventures of a dinosaur hunter
266 p., Texas Christian University Press Fort Worth

Contrariamente a otros muchos libros actuales destinados al gran público y cuyo tema son los dinosaurios, esta obra va dirigida especialmente a lectores que poseen ya una cierta base, pero que están interesados sobre todo por la historia del descubrimiento de los dinosaurios y la práctica paleontológica, tanto en los yacimientos como en el laboratorio. Se trata, en realidad, de las memorias de R.T. Bird, una figura secundaria, pero muy interesante y simpática, de la paleontología americana de los años 1930 y 1940. Después de su fortuito encuentro con Barnum Brown (el último gran «cazador de dinosaurios» de la talla de los Cope, Marsle y Sternberg, que trabajaba en el American Museum de Nueva York), la joven R.T. Bird, sin ningún título universitario, se convirtió en su auxiliar habitual. Aprendió en los campos de trabajo y participó en asombrosas campañas de excavaciones (de ahí el título del libro). Su carrera culminó con el descubrimiento, la extracción y la exposición en el American Museum de las extraordinarias huellas de Paluxy River, que permiten ver el avance de un brontosaurio perseguido por un carnívoro bípedo.

Magia del Oeste, peripecias y aventuras múltiples, escritura agradable... el libro posee todos los ingredientes necesarios para agradar a un amplio sector de público, que podrá iniciarse en el contexto científico gracias a la inteligente presentación general de J. Farlow. Por otra parte, las memorias de R.T. Bird contienen unas anotaciones y observaciones, siempre espontáneas, que resultan preciosas para quien esté interesado en la sociología de Estados Unidos de la época posterior a la depresión. Finalmente, el libro debería interesar también a los historiadores de la ciencia, que son más sensibles al estudio concreto, «a ras de suelo», de las prácticas y de las técnicas que al majestuoso despliegue de los conceptos. ■

B. Kevles
Females of the species
270 p., Harvard University Press

Este libro insiste, y con razón, sobre el papel y el interés de las hembras entre los animales, lo cual constituye un sesgo muy útil en comparación con los estudios etológicos y ecológicos centrados principalmente en el papel de los machos. Destinado a lectores no especializados, a pesar de que puede dar ejemplos y referencias a estudiantes y profesores, este libro resulta decepcionante. Demasiados ejemplos son presentados de manera demasiado sucinta, aparte de que no todas las referencias figuran en la bibliografía. El defecto principal es que interpreta todos los datos como resultado de la selección natural, lo que implica una tautología y un razonamiento *a priori*. De esta manera, la presencia de un comportamiento en una especie, así como su ausencia en otra, se considera siempre como una «solución óptima». La edición encuadernada tiene un precio excesivo; es mejor leer este libro en su versión en rústica. ■

N. y J. Chavaillon
Gotera, un site paléolithique récent d'Ethiopie
60 p., Editions Recherche sur les Civilisations, ADPF

Esta publicación sobre el yacimiento arqueológico de Gotera, atribuido por los autores a la *Middle Stone Age*, pero no datado, viene a llenar un vacío en los datos disponibles sobre el paleolítico de Etiopía, del cual sólo se conocen bien los períodos antiguos. Sin embargo, en este caso únicamente se trata de la descripción tipológica de un material de superficie poco abundante, recogido en distintos puntos de las riberas del antiguo lago de Gotera y que, quizá, decepcionará la espera del lector ansioso de conocer principalmente la prehistoria etíope. ■

F.Brelet
Le T.A.T. Fantasme et situation projective
188 p., Dunod

Nadie que esté interesado en Francia por el T.A.T. puede ignorar la aportación de Vica Shentoub en la elaboración de la práctica de esta técnica proyectiva nacida en los Estados Unidos hace más de cincuenta años. El T.A.T. era clásicamente apreciado por su finura en la discriminación de los diferentes cuadros clínicos de la neurosis y en la diferenciación de los procesos primarios y de los procesos secundarios, designando así los diferentes mecanismos de defensa que actúan en la neurosis y la psicosis.

Lo que sin duda es interesante del trabajo de F.Brelet es la ampliación del campo de utilización del T.A.T.: las problemáticas de narcisismo, los estados límites y las depresiones son las nuevas categorías nosográficas que se consideran en esta prueba psicotécnica. El trabajo de investigación y de reflexión alrededor de este test es enriquecido por un sólido apuntalamiento teórico y por la ilustración de una veintena de casos clínicos. ■

Aviones: ¿el retorno de la hélice?

Más de treinta años después de haber sido suplantada por el reactor ¿va a ganar la hélice el terreno perdido? ¿Estarán dotados los aviones del mañana de hélices de tres a cinco metros de diámetro, girando a velocidades supersónicas? Es posible, puesto que la realización de una hélice rápida, que hasta ahora sólo era un sueño, actualmente es posible gracias a la puesta a punto de nuevos materiales excepcionalmente sólidos... y también, como era de esperar, al ordenador. En Estados Unidos, Europa y Japón, varios programas de investigación están poniendo a punto y ensayando estas nuevas hélices (figs. 1 y 2). Y esto sucede precisamente en el momento en que los diseñadores de aviones y de motores planifican los ensayos en vuelo de los aviones de transporte de los años 1990-2000...

La principal razón de la pérdida de interés por la propulsión por hélice en los años 1950 se debió a su falta de competitividad con relación al reactor bajo, y deja sin competencia a la propulsión por reactor, cuyo rendimiento se ve muy poco afectado por la velocidad de crucero. Sin embargo, permanece el hecho de que la hélice es intrínsecamente más económica que el reactor. Por esta razón, los diseñadores de aviones nunca han renunciado a la idea de construir algún día una hélice rápida que mantuviese un buen rendimiento a gran velocidad.

Siempre más rápidas

Paradójicamente, la solución teórica de este problema era conocida desde hace cuarenta años. Se sabía que, para que una hélice fuese eficaz hasta velocidades del orden de 850 km/h a 10,5 km de altitud, bastaba con que sus palas fuesen muy finas y que tuviesen su extremidad doblada hacia atrás, de forma parecida a las alas de un avión. También se sabía que, multiplicando el número de palas, era posible construir

A

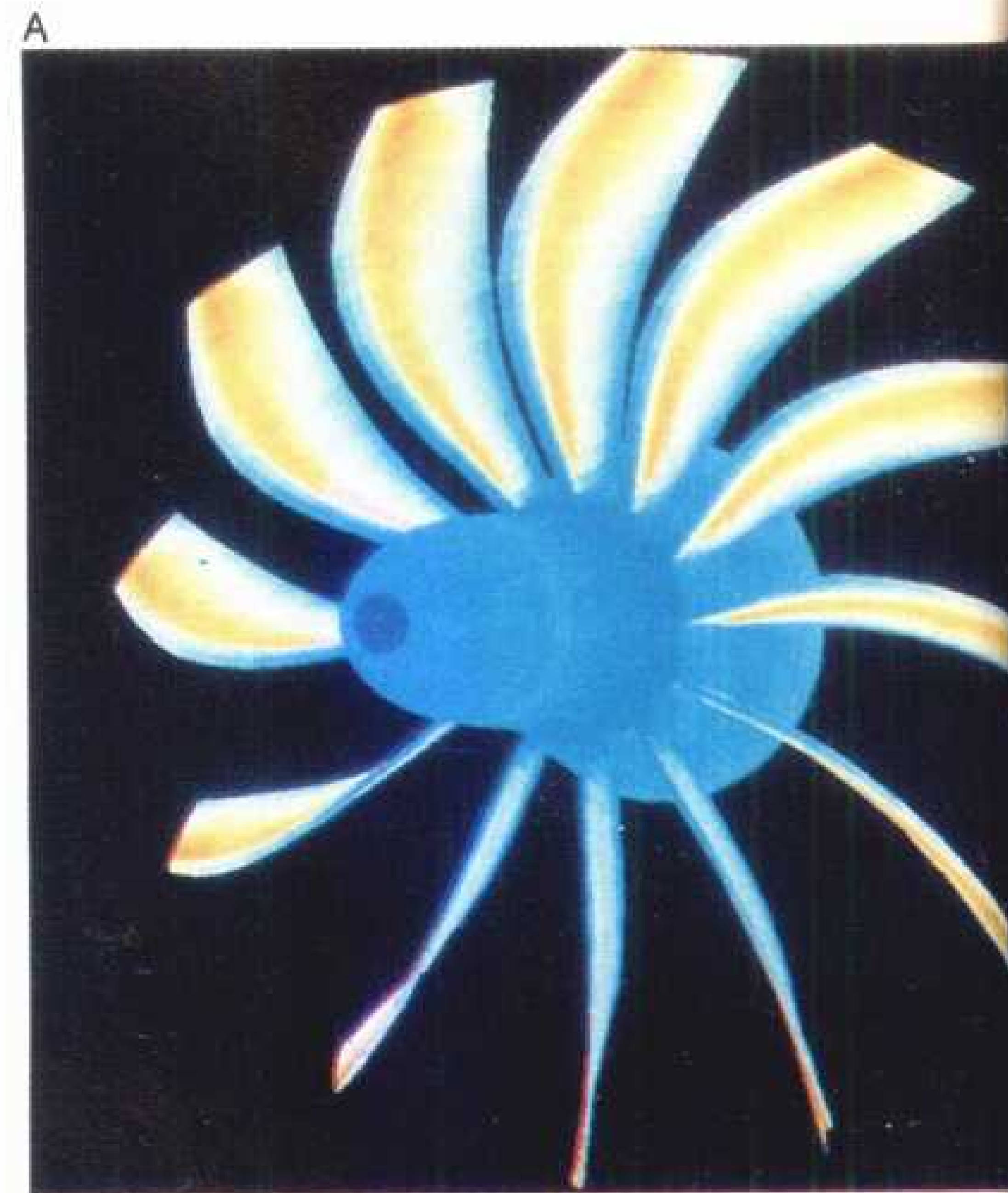




Figura 1. Gracias a la reciente puesta a punto de materiales extremadamente resistentes, hoy es posible construir hélices de grandes prestaciones aerodinámicas a gran velocidad, imposibles de obtener con hélices clásicas. Si bien numerosos fabricantes de motores están interesados desde hace unos diez años, la demostración en vuelo de este tipo de motor sólo ha empezado. Así, el motor de arriba, llamado UDF o «unducted fan», el más reciente motor norteamericano de hélica rápida, fue ensayado en el Boeing 727 en agosto de 1986. Podría equipar los 7J7 de la Boeing, que deberían de comercializarse hacia 1995. La hélice del UDF tiene dos filas de palas que giran en sentido inverso, configuración que permite minimizar las pérdidas de energía debidas al régimen de rotación elevado. Este motor ha sido desarrollado por General Electric (apoyada por la NASA) y podría equipar los aviones de recorrido medio del futuro. (Foto General. Electric.)

para velocidades de crucero superiores a 550 km/h. Esto se debía a que alrededor de las palas clásicas aparecían fenómenos aerodinámicos indeseables (desarrollo de zonas de derrame transónico), porque su forma y su grosor no estaban adaptados a dichos regímenes. El rendimiento de la hélice es entonces muy una hélice de diámetro razonable. Sólo había un obstáculo: la construcción de palas metálicas a la vez finas y suficientemente resistentes era imposible. Hoy día, gracias a lo que se llaman materiales compuestos –como las fibras de carbono de alta resistencia moldeadas en una matriz de resina– y a las nuevas aleaciones –especialmente las de titanio para los pies de las palas– los ingenieros pueden finalmente franquear esta limitación.

La hélice rápida, digna heredera de los reactores

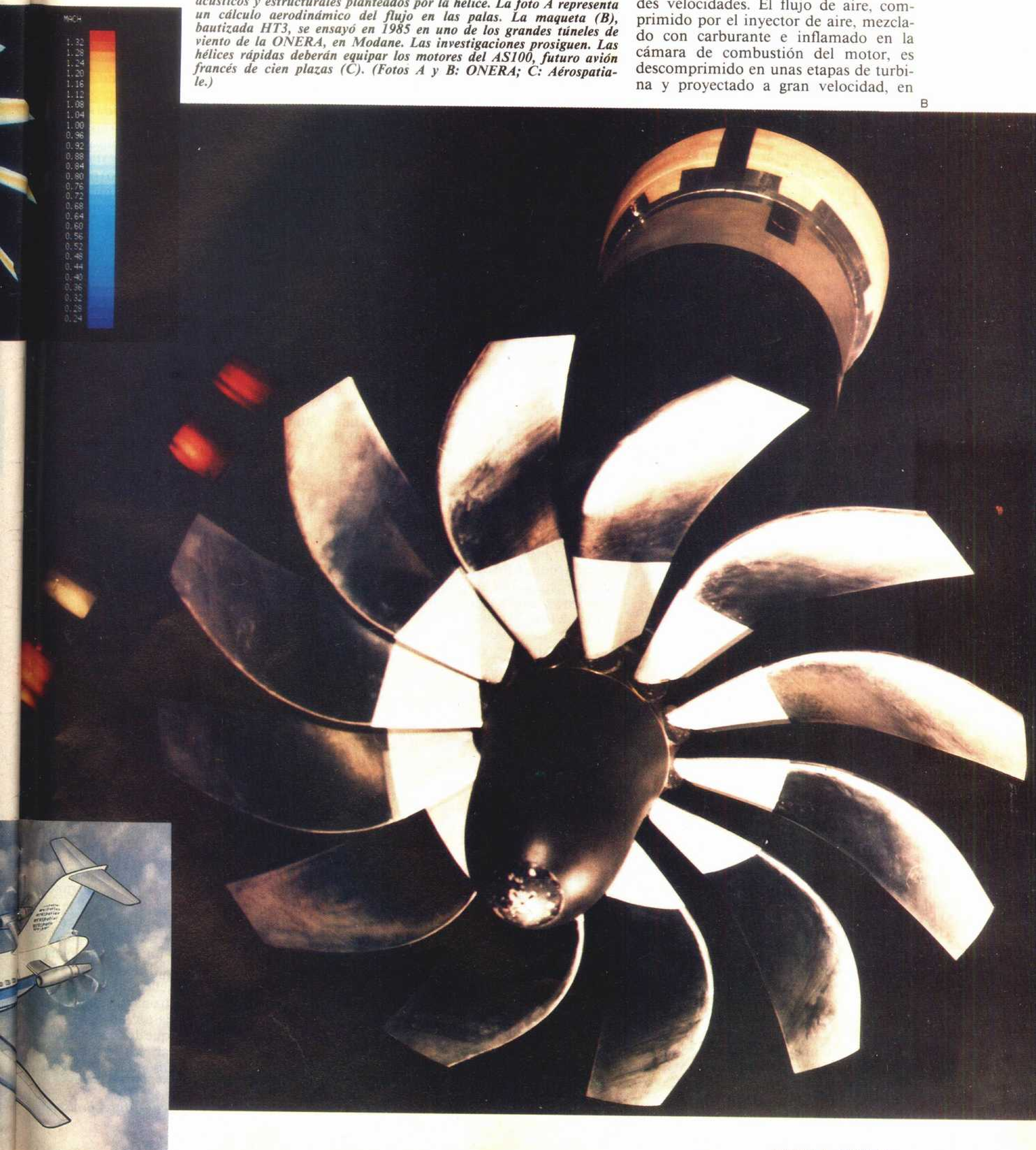
Considerada por algunos como una verdadera revolución en la propulsión, la hélice rápida es más que nada una consecuencia lógica de la evolución de los reactores en los últimos veinticinco años. Para comprenderlo hay que remontarse a los año 1960. En esta época, la hélice fue eliminada por el reactor llamado de simple flujo. En este tipo de reactor, el flujo de aire que asegura la propulsión es canalizado en el interior de una envoltura o carenaje, y después es comprimido en las etapas de compresión (o de inyección) de pequeño diámetro. Las prestaciones de estos com-

C



Figura 2. En Francia, el estudio de una ***hélice rápida de tamaño*** *reducido se está realizando en el marco de la operación* ***CHARME*** *(véase el texto), por iniciativa de la ONERA.* ***Antes de la construcción*** *de la maqueta se aplicaron los más recientes* ***métodos de concepción*** *asistida por ordenador para* ***resolver los problemas aerodinámicos, acústicos y estructurales planteados por la hélice. La foto A representa*** *un cálculo aerodinámico del flujo en las palas.* ***La maqueta (B),*** *bautizada HT3, se ensayó en 1985 en uno de los grandes túneles de viento de la ONERA, en Modane.* ***Las investigaciones prosiguen. Las*** *hélices rápidas deberán equipar los motores del AS100, futuro avión francés de cien plazas (C). (Fotos A y B: ONERA; C: Aérospatiale.)*

presores, que son unas pequeñas hélices con un gran número de palas, relativamente poco afectadas por los fenómenos aerodinámicos que aparecen a grandes velocidades. El flujo de aire, comprimido por el inyector de aire, mezclado con carburante e inflamado en la cámara de combustión del motor, es descomprimido en unas etapas de turbina y proyectado a gran velocidad, en



sentido inverso al del movimiento del avión. Esta arquitectura permite asegurar la propulsión sin limitación de velocidad.

Sin embargo, si los reactores actuales consumen menos carburante que los de los años 1960 es porque, en cierta manera, su arquitectura es un compromiso entre la hélice y el reactor de hace veinticinco años. Sin entrar demasiado en detalles, puede decirse que cuando la cantidad de aire que circula por la cámara de combustión disminuye, es evidente que el motor consume menos carburante. Paralelamente, la pérdida de empuje que resulta de ello puede compensarse aumentando la cantidad de aire puesto en movimiento mediante un inyector de aire de mayor diámetro. Por esta razón, los reactores actuales, llamados de doble flujo, canalizan una parte del aire en un flujo secundario (llamado flujo frío) que, comprimido en el inyector, se descomprime directamente en una tobera. La relación entre el flujo frío (poco acelerado) y el flujo caliente (fuertemente acelerado después de su paso por las etapas de inyección, por la cámara de combustión y por las etapas de turbinas) se llama tasa de dilución del reactor. Así, cuanto más elevada es la tasa de dilución, más económico es el motor. La tasa de dilución de los reactores más modernos (CFM 56-5, V2500...) es próxima a 6, y es probable que aumente en el decenio 1990-2000. Para tasas de dilución comprendidas entre 10 y 15 se puede conservar la misma arquitectura, con una economía de carburante suplementaria del 10 a 115 %.

Sin embargo, para reducir el consumo de un 20 a un 30 %, serán necesarias unas tasas de dilución comprendidas entre 40 y 80. Entonces, el carenado que envuelve el inyector alcanzaría unas proporciones desmesuradas, y su resistencia al movimiento (o resistencia aerodinámica) sería prohibitiva: esto significa que habrá que suprimirlo, dejando el inyector de gran diámetro al aire libre, como una hélice. Por tanto, sólo hay que dar un paso para afirmar que el heredero del reactor no es otro que el motor de hélice rápida. Queda por saber si esta evolución proseguirá o no... Dada la complejidad de las hélices rápidas, su comercialización sólo podrá realizarse si se inician importantes programas de investigación, a menudo largos y caros, sostenidos por no menos largos y caros programas de desarrollo. En sus primeras fases, estos programas se destinan a comprobar la validez del concepto desde los puntos de vista aerodinámico, acústico y estructural, en primer lugar en ordenador, y después en maquetas de pequeñas dimensiones. Los programas más avanzados están actualmente en el estado de la demostración en vuelo en prototipos de motor completo. Esta última etapa también es indispensable, puesto que permite afinar el diseño de motores equipados con estas hélices a una escala realista y definir claramente los problemas que se plantean para la arquitectura del avión. Además, la demostración en vuelo permite convencer a las autoridades de certificación y a las compañías aéreas, clientes potenciales, del grado de fiabilidad y de confort –la acústica en particular– que asegurará este tipo de motor.

En Estados Unidos se han desarrollado dos tipos de motores. El primero es el «prop-fan», en el que la hélice, situada delante del motor, está acoplada a un turbomotor mediante un reductor de velocidad análogo a la caja de cambios de un automóvil. Las investigaciones norteamericanas sobre el prop-fan empezaron en 1975 por iniciativa de la sociedad Hamilton-Standard, bien pronto sostenidas por la NASA. Los estudios de base condujeron a ensayos en maquetas de pequeño diámetro (60 cm) en túnel de viento, para el estudio de los problemas aerodinámicos y aeroelásticos, y en vuelo para el estudio de las molestias acústicas.

Este primer programa se ha concentrado en la realización de una hélice rápida de 2,7 m de diámetro (aproximadamente la mitad del diámetro de una hélice realista).(1) Será montada en el ala de un Gulfstream II por Lockheed, para ensayos en vuelo a principios de este año. En paralelo, Hamilton-Standard estudia unas maquetas de propfan que tienen dos hileras de palas girando en sentido inverso, y prevé construir un demostrador a escala realista en colaboración con Allison, un fabricante norteamericano de motores. Esta disposición de palas permite minimizar la torsión del flujo generado por la rotación de la hélice y, por tanto, las pérdidas de energía que se producen.

Para las grandes potencias necesarias en los aviones de gran capacidad, la realización de reductores corre el riesgo de resultar delicada, si no imposible. Por esta razón, a partir de 1982, la NASA apoyó el desarrollo de un segundo tipo de motores llamado «unducted fan», en colaboración de General Electric (fig. 1).(2) En éste, dos etapas de turbinas lentas, que giran en sentido inverso, accionan dos filas de palas situadas en la parte posterior del motor, sin ningún reductor intermedio. Estas investigaciones se realizaron a buen ritmo: ensayos aerodinámicos y acústicos en maquetas; después, desarrollo de un demostrador equipado con una hélice de 3 m de diámetro y construido alrededor de un motor ya existente (F404). El conjunto se ensayó en vuelo montado en un Boeing 727 en agosto de 1986.

La operación CHARME

El objetivo de la operación CHARME es el estudio de una hélice de 1 m de diámetro (aproximadamente cinco veces más pequeña que una hélice realista). A escala natural, esta hélice tendría la misma potencia que los reactores «CFM 56» destinados a equipar los futuros A-320 del Airbus.

Antes de construir la maqueta aplicamos más recientes métodos de cálculo por ordenador (diferencias finitas, elementos finitos, etc.) a fin de resolver, a partir de un modelo matemático de la hélice, los problemas aerodinámicos, acústicos y estructurales planteados por su diseño. Una vez construida la maqueta, bautizada con el nombre de HT3, se ensayó en 1985 en uno de los grandes túneles de viento de la ONERA, en Modane. Este ensayo permitió comprobar el buen funcionamiento de la hélice a grandes velocidades de crucero (equivalente a 800 km/h en vuelo) y realizar numerosas mediciones finas de presión y de esfuerzos sobre las palas. Comparados con los resultados de los cálculos, estos resultados experimentales también servirán para comprobar la validez de las predicciones del modelo de partida. En lo referente a nuestras investigaciones sobre las hélices rápidas con dos filas de palas girando en sentido inverso, ya se han iniciado, y podrían concretarse en el lanzamiento de una operación CHARME 2 entre ahora y 1988.

También existen programas de investigación en Gran Bretaña por iniciativa de Rolls-Royce de Dowty, así como en Japón bajo el impulso del MITI (Ministerio de comercio e industria internacionales).

Los fabricantes de aviones tienen en cuenta estas nuevas hélices en sus proyectos: la Boeing para 717, que podría ser comercializado hacia 1995, la Douglas para una renovación de los motores del DC9-80, y la France Aérospatiale para el AS100, futuro avión de 100 plazas (fig. 2). Estos proyectos corresponden a aviones de capacidad media, de recorrido corto o medio, a velocidades de crucero entre 750 y 850 km/h, que actualmente parecen difíciles de superar por razones aerodinámicas y acústicas. Por esta razón, los fabricantes de motores estudian en paralelo motores más tradicionales, de gran tasa de dilución, con o sin reductor de velocidad (Rolls-Royce en Gran Bretaña, Motoren und turbinen union –MTU– en la República Federal de Alemania, Pratt and Whitney en Estados Unidos). Como los intereses industriales son muy importantes, se tejen estrategias y alianzas y, a veces, los argumentos científicos en favor de tal o cual tipo de propulsión quedan relegados a un segundo plano. Por tanto, todavía es difícil afirmar que los méritos de las hélices rápidas serán suficientes para destronar al reactor de aquí a diez años... Es un lapso de tiempo muy corto para que los investigadores puedan terminar los estudios de optimización de estos nuevos motores.

Jean-Marc Bousquet.

(1) C.L. *et. al., A report on the initial testing of the large scale advanced propfan,* AIAA Paper, 86-1551, 1986.
(2) A.R. Stuart, *The unducted fan engine,* AIAA Paper, 85190, 1985.
(3) J.M. Bousquet, *Theorical and experimental analysis of highspeed propeller aerodynamics,* AIAA Paper, 86-1549, 1986, y ONERA TP 1986-64.

colección Ciencias
LIBROS PARA LOS LECTORES DE MUNDO CIENTIFICO

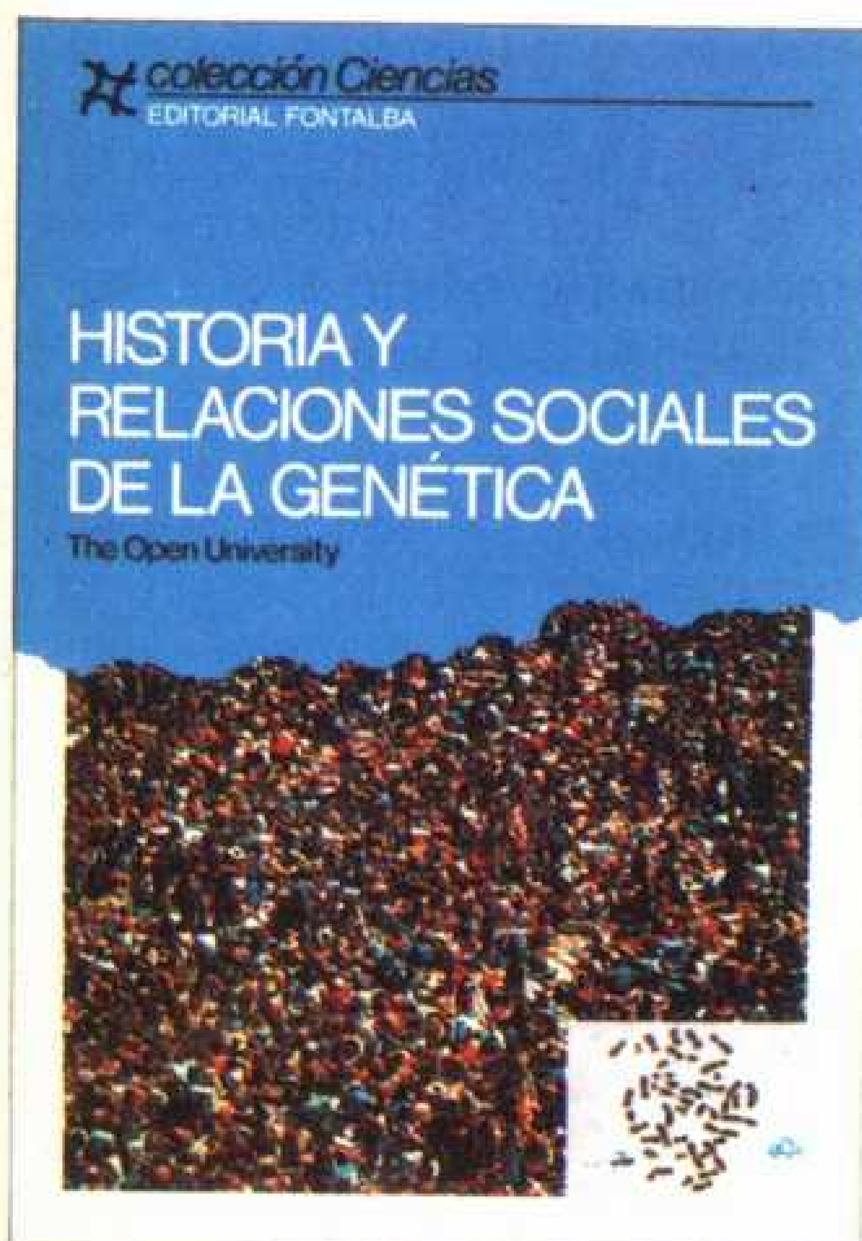
LA RECHERCHE, *versión en castellano*



LA TRASTIENDA DEL SABIO (Profusamente ilustrada)

¿Cuál es el significado social de la ciencia?
Pierre Thuillier hace una critica rigurosa sin olvidar la ironia ni la anécdota y plantea una de las más importantes cuestiones de este fin de siglo: ¿cuál es la finalidad de la ciencia?
Un libro apasionante, corrosivo y profusamente ilustrado.

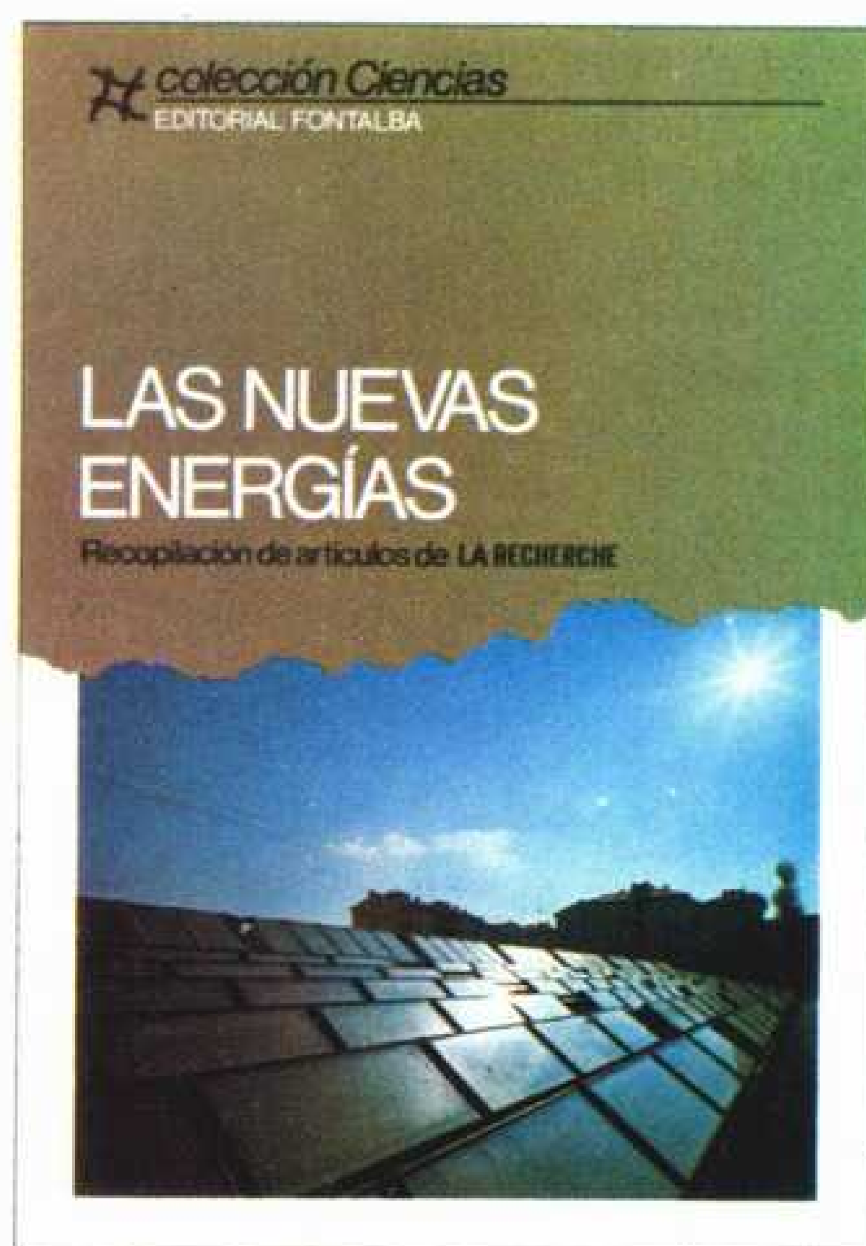
Formato: 29 × 21 cm – Páginas: 120 – Fotografias e ilustraciones.
P.V.P.: 1.100 ptas.



HISTORIA Y RELACIONES SOCIALES DE LA GENÉTICA

¿Por qué unas determinadas ideas científicas o ciertas tecnologías surgen en un momento dado?
¿Cuál ha sido la relación entre la genética y la sociedad a lo largo de la historia?

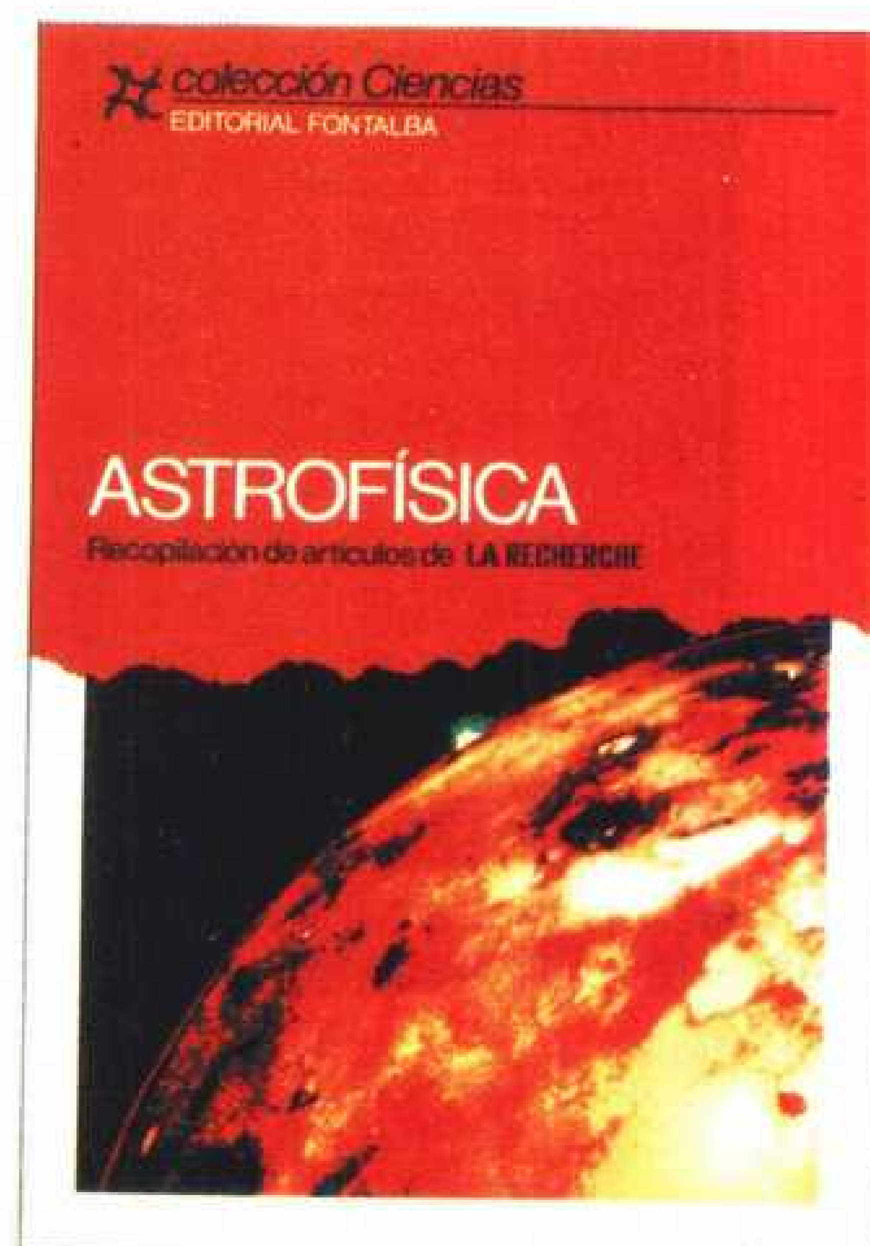
Formato: 21 × 14,5 cm – Páginas: 192 – Fotografias e ilustraciones.
P.V.P.: 600 ptas.



LAS NUEVAS ENERGÍAS

La crisis ha llevado a un desarrollo masivo de las investigaciones sobre las fuentes y los medios de producción de energías cada vez más diversas.
Los conocimientos y proyectos actuales de la investigación sobre las nuevas energías.

Formato: 21 × 14,5 cm – Páginas: 274 – Fotografias e ilustraciones.
P.V.P.: 950 ptas.



ASTROFÍSICA

Interdisciplinaria por naturaleza, la astrofísica es hoy un campo donde se cotejan y enriquecen mutuamente las disciplinas científicas modernas. El balance de la investigación en astrofísica realizado por los mejores especialistas.

Formato: 21 × 14,5 cm – Páginas: 210 – Fotografias e ilustraciones.
P.V.P.: 950 ptas.

ENVÍE O COPIE EL CUPÓN-PEDIDO A Editorial Fontalba, s.a.

VALENCIA, 359 - 6.º
BARCELONA-9 (ESPAÑA)
TELS. (93) 258 55 07/258 55 08

CUPÓN-PEDIDO

Ruego que se sirvan enviarme los siguientes libros contrarrembolso (libre gastos de envio).

N.º Ejemplares	Título	Precio
	TOTAL	

Nombre ______________________

Domicilio ______________________

Población ______________ C.P. ______

Provincia ______________________

Cuyo pago efectuaré mediante:
☐ Talón bancario adjunto
☐ Contrarrembolso.

Cuando un glaciar aumenta su velocidad y provoca una catástrofe ecológica.

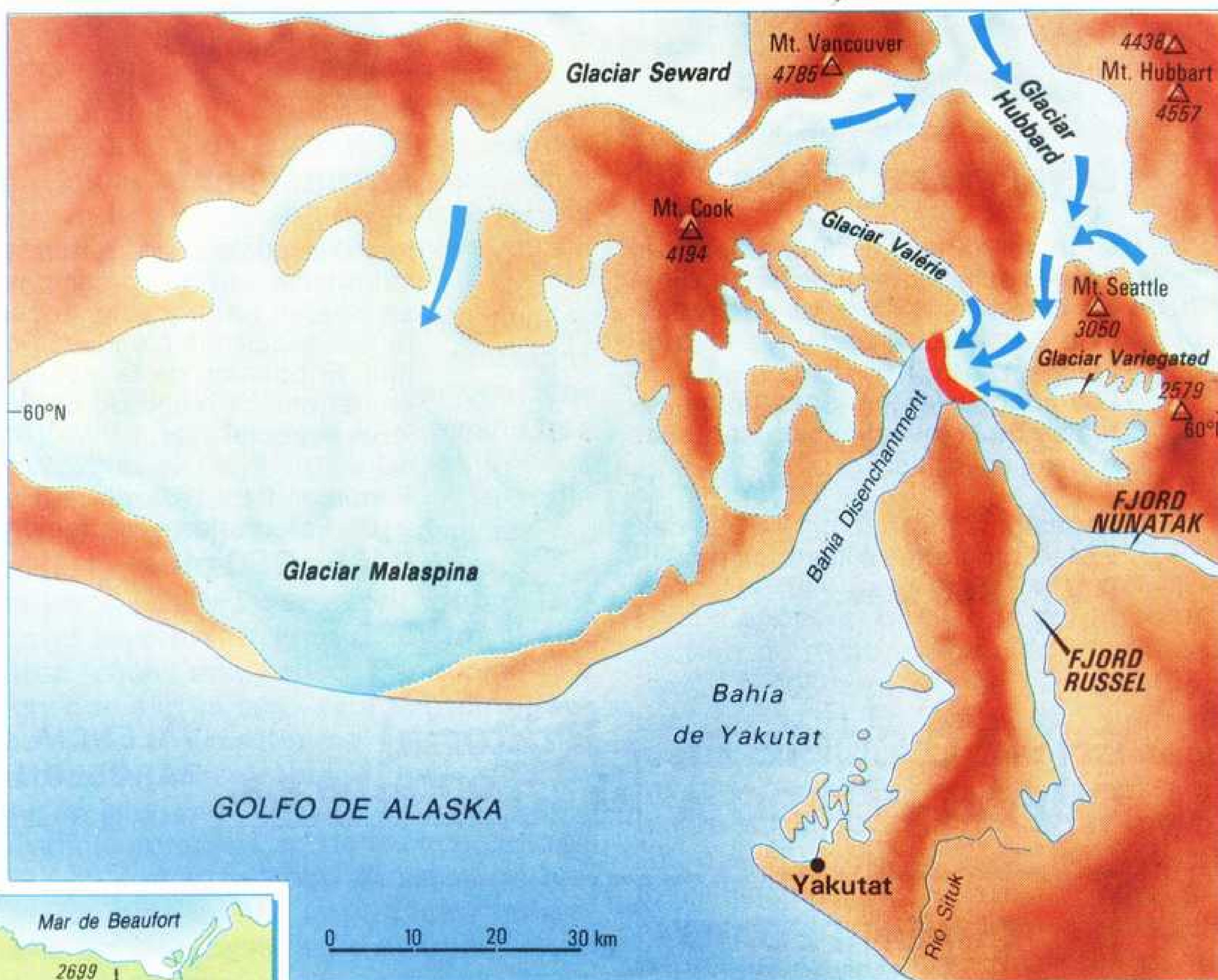
La espectacular avenida del glaciar Hubbard

El glaciar Hubbard en Alaska acaba de recordarnos contundentemente la importancia de las catástrofes de origen glaciar. Situado en la frontera canadiense, inició en la primavera de 1986 una progresión espectacular y ha batido marcas de velocidad al alcanzar en algunos lugares 34 metros por día. El manto de hielo, de unos 6 kilómetros de anchura, ha penetrado en la bahía Disenchantment y en su avance ha bloqueado el acceso al mar del fiordo Russell (fig. 1). El nivel de agua en este fiordo ha aumentado provocando la inundación de los terrenos circundantes. Al final del mes de julio de 1986, la diferencia con el nivel del mar era ya de 10 metros. Además, el agua de fusión del glaciar llenó el fiordo de agua dulce y la fauna marina aprisionada (focas, marsopas, salmones, nutrias marinas) está probablemente condenada a la desaparición.

Ante la magnitud de este cataclismo ecológico se plantean numerosas preguntas, entre otras ¿cuál es la naturaleza de este fenómeno sorprendente? ¿pueden todos los glaciares iniciar un día u otro esta especie de «sprint»? y, en particular ¿qué sucede en los glaciares alpinos?

Un fenómeno conocido en todo el mundo

El avance brusco y catastrófico de los glaciares en realidad sólo se conoce desde principios de siglo.[1] En esta época, en efecto, se descubrió que numerosos glaciares de Alaska, especialmente en la región de Yacutat Bay (fig. 1) donde se encuentra el glaciar de Hubbard, podían presentar progresiones muy rápidas llamadas avenidas y también crecidas. Se caracterizan por una velocidad particularmente elevada (hasta 65 metros por día en el glaciar Variegated), del orden de cien veces la velocidad habitual de progresión de estos glaciares, durante algunos meses. Se constata luego, además de un fuerte avance del frente del glaciar (del orden de varios kilómetros), que la superficie del glaciar es muy caótica, extremadamente agrietada y que se produce un fuerte descenso del nivel de la zona superior en la que la nieve se acumula habitualmente. Una vez terminado este breve episodio, prácticamente toda la zona inferior llamada de ablación (en la que se funde más hielo del que se forma) se inmobiliza y funde en el lugar, ya que el glaciar deja de estar en equilibrio con las condiciones climáticas.



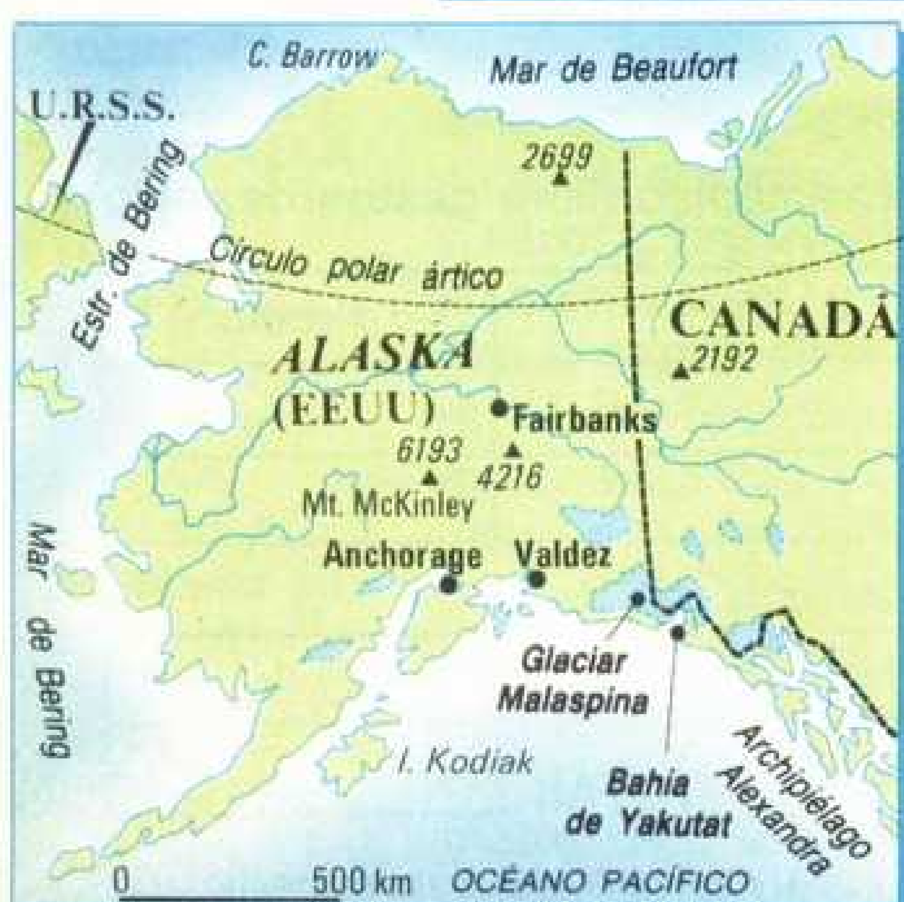


Figura 1. En la primavera de 1986 el glaciar Hubbard inició un tremendo avance y su velocidad alcanzó en algunos sitios 34 metros por día. La capa de hielo, de unos 6 kilómetros de anchura (en rojo en el mapa), ha invadido la bahía Disenchantment. En su avance ha cortado el acceso al mar del fiordo Russel, cuyo nivel de agua ha aumentado provocando la inundación de los terrenos circundantes. Al final de julio de 1986, la diferencia con el nivel del mar ya era de 10 metros. Además, el agua de fusión del glaciar llenó el fiordo de agua dulce, lo que provoca la pérdida de los animales marinos aprisionados (focas, marsopas, salmones...). Aunque esta avenida catastrófica ha trastornado las previsiones, no es excepcional ya que hay que señalar que nueve glaciares de la bahía Yacutat son conocidos por presentar este fenómeno de progresión rápida, o crecida, también llamado avenida. En particular el glaciar Variegated, cuya avenida de 1982-1983 hizo ya posible una mejor comprensión de las mismas.

Al menos veinte glaciares que presentan estas avenidas han sido catalogados en Alaska, pero también se encuentran en el Pamir, en los Andes y en el Spitzberg. Es un fenómeno poco más o menos periódico, con períodos que van desde diez años a un siglo según los glaciares. Las causas de las avenidas empiezan a conocerse mejor, en especial gracias al esfuerzo de varios equipos norteamericanos que han estudiado la del glaciar Variegated en 1982-1983.[2] Éste presenta un período de unos veinte años entre dos avenidas que ha permitido seguir su evolución varios años antes y durante el fenómeno. En épocas normales, un glaciar fluye por efecto del peso y su movimiento es habitualmente limitado por el rozamiento con el lecho. Resulta del estudio de Variegated, que, en el caso de una avenida, este rozamiento disminuye marcadamente debido a la acumulación de agua en la base del glaciar. Este agua proviene de la fusión del hielo en la superficie o sobre el lecho, como resultado del calor desprendido por la deformación de aquél y por el flujo de calor que se desprende continuamente del interior de la Tierra. En general, el agua así producida fluye bajo el glaciar hacia el frente por anchos canales. Parece que en una avenida, estos canales se ciegan y que el agua se acumula ejerciendo fuertes presiones. Entonces el agua no sólo tiene un efecto lubricante, sino que también disminuye la presión del glaciar sobre el lecho rocoso, lo que facilita mucho el deslizamiento.

Pero todavía no se sabe todo sobre este fenómeno, en particular porque algunos glaciares presentan este comportamiento y otros no. Quizá las causas sean diferentes, según que el glaciar esté totalmente a la temperatura de fusión —se le llama entonces glaciar templado— (como la mayoría de los glaciares de Alaska) o en parte frío (como en Spitzberg o en los Andes). Por el momento, este fenómeno no parece estar relacionado de una forma sencilla con las variaciones del clima, al menos en el caso de los glaciares templados.

Así, en los Alpes no se ha registrado nunca ninguna avenida catastrófica o crecida, y a pesar de que se presentan de vez en cuando progresiones muy rápidas, no se han descrito nunca alteraciones completas como las que caracterizan a las avenidas. Sin embargo, los



Figura 2. El Mer de Glace *situado en el macizo del Mont-Blanc es el mayor glaciar de los Alpes franceses. Durante el período de la pequeña era glaciar (1600-1820) se extendía ampliamente por el valle de Chamonix formando una lengua terminal impresionante. Luego experimentó una fuerte disminución, y el cordón de residuos rocosos arrancados de las paredes (la morrena lateral), en la orilla derecha del glaciar, atestigua el nivel que alcanzaba entonces un centenar de metros por encima del nivel actual. La parte más gruesa está a mitad del recorrido del glaciar: allí donde el valle glaciar se presenta como un semicilindro de 400 metros de radio (parte curso arriba, a la derecha en la fotografía). Las ojivas oscuras y claras que señalan regularmente la superficie a lo largo de 6 kilómetros de longitud se llaman bandas de Forbes. Traducen una velocidad de progresión del glaciar más rápida en el centro que en los bordes. Se forman por caída de* séracs *y materializan las estaciones sucesivas a razón de una banda clara por invierno y una oscura por verano. Las variaciones del grosor de estos glaciares se siguen anualmente por medio de medidas topográficas a lo largo de cinco perfiles transversales fijos y de una quincena de largas perchas o balizas de ablación hundidas en la parte central del glaciar. La medida de la fusión o balance varía desde 0 a 2 800 m de altura en hasta unos 14 metros de hielo al año, a 1 500 metros de altura cerca del frente. (Foto de Donnou-Rado del Servicio Aerocartográfico LGGE.)*

glaciares de los Alpes han experimentado en estos últimos siglos muchos cambios, descritos con detalle suficiente para poder disponer actualmente de una interpretación más clara de sus diferentes fases de avance y retroceso.

Los glaciares alpinos pueden ser peligrosos

Mientras que se dispone de muy pocas narraciones sobre la actividad de los glaciares durante la edad Media –eran entonces muy reducidos y casi inexistentes según los pocos relatos que citan el paso de puertos de alta montaña por los hombres y sus rebaños, especialmente el puerto del Gigante en el macizo del Mont-Blanc– a partir del año 1600 se estableció un período de dos siglos en el que todos los glaciares experimentaron un gran crecimiento y devastaron pastizales, campos cultivados e incluso algunas viviendas. Es la llamada «pequeña era glaciar» muy estudiada en la literatura[3,4,5] y en particular en obras que se han convertido en clásicos como el *Traité de glaciologie* de Louis Lliboutry y *Le climat despuis l'an Mil* de Enmanuel Le Roy-Ladurie. Durante este período se vio avanzar a los glaciares por los valles y cerrar otros adyacentes: de este modo pudieron desarrollarse lagos importantes río arriba de las presas de hielo por acumulación de las aguas torrenciales, como en el caso del glaciar Hubbard en el fiordo Russel. Ahí están, los ejemplares célebres de los glaciares del Vernagt en Austria, del glaciar de Gietroz y Allalin en Suiza, con inevitables rupturas de estas barreras e inundaciones de los valles río abajo, con varias recidivas en el curso del tiempo. Del mismo modo en Vanoise (Francia), el glaciar de Lepenaz, en el valle del Doron en Champagny, provocó en 1818, la formación, de un lago cuya ruptura devastó las tierras hasta una cuarentena de kilómetros río abajo. Hubo así todo un conjunto de catástrofes muy dañinas, pero previsibles ya que sus causas son evidentes. Hay otras más perniciosas, ya que su preparación es ocultada por el glaciar: se trata de las bolsas de agua que se sitúan en el interior debajo del glaciar. Algunos glaciares desarrollan así en algunos años un importante almacenamiento de agua que se libera periódicamente durante el verano, como el glaciar del Trient en el macizo del Mont-Blanc en la frontera franco-suiza. Esta liberación de agua, llamada aquí la «Tina» del Trient, liberó más de un millón de metros cúbicos en agosto de 1966. Pero la catástrofe más mortífera en Francia fue la debida a la ruptura de la bolsa de agua situada en el centro del glaciar de Tête Rousse (macizo del Mont Blanc) ocurrida en la noche del 11 al 12 de julio de 1892: 200.000 m^3 de agua descendieron desde 3.150 metros de altura hasta el fondo del valle a 600 metros. En su caída, el agua arrastró los materiales desplazables formando una colada fangosa rápida, que se llama «lava», depositando finalmente 800.000 m^3 de sedimentos hasta el pueblo de Fayet. Numerosas casas fueron destruidas, entre ellas una parte del establecimiento balneario de Saint-Gervais, y se contaron ciento sesenta y cinco muertos. Entre otras manifestaciones catastróficas imprevisibles de los glaciares cuentan también las caídas de *séracs.* Los *séracs* son masas inestables de hielo surcadas de grietas profundas *(crevasses)* que se forman cuando la lengua glaciar pasa por encima de un relieve y se rompe. La caídas de *séracs* sobrevienen sin signos precur-

(1) W.O. Field, *Mountain glaciers of the Northern hemisphere,* CRREL, 1975.
(2) B Kamb *et al. Science, 227,* 469, 1985.
(3) L. Lliboutry, *Traité de glaciologie,* t. 2, Masson, París, 1965, p. 400.
(4) E. Le Roy Ladurie, *Le climat despuis l'an Mil,* Flammarion, 1967.
(5) R. Vivian, *Les glaciers des Alpes occidentales,* Allier. Grenoble, 1975, p. 513.

sores algunas veces desencadenadas por un seísmo, la única prevención posible consiste por tanto en no establecerse ni permanecer siquiera en los lugares expuestos (glaciar del Tour, agosto de 1949: seis muertos; Huascarán, Perú, 1970: dieciocho mil muertos).

Las caídas de *séracs* incluso provocan a veces la ruptura de lo que los especialistas llaman un lago proglaciar. Estos lagos se forman en el espacio que ha quedado libre entre el glaciar que retrocede y la acumulación de materiales diversos arrancados del lecho que se halla delante del antiguo frente del glaciar (morrena frontal). Estos lagos son alimentados por el torrente surgido del glaciar, y cuando hay ruptura de la presa constituida por morrenas, coladas de lava de barro arrasan el valle río abajo. Este problema, particularmente agudo en Perú, donde hay centenares de lagos de este tipo, puede solucionarse con la construcción de un aliviadero que limite fuertemente el nivel del lago y, por tanto, su volumen. En los Alpes franceses sólo hay, afortunadamente, algunos raros ejemplos de lagos proglaciares con presa morrénica. El único que recientemente se desarrollaba de una forma inquietante acaba de recibir en la primavera de 1986 un acondicionamiento que evita un desbordamiento intempestivo susceptible de provocar una «lava». Se trata del lago del glaciar de Arsine en el macizo de Ecrins.

Finalmente, hay que mencionar también los volcanes activos coronados de casquetes glaciares que, tras una erupción de cenizas, sufren una fusión superficial que libera bruscamente un gran volumen de agua y también avalanchas de *séracs* desestabilizados por los seísmos asociados. Fue así como el Nevado del Ruiz provocó en Colombia en el mes de noviembre de 1985 numerosas lavas torrenciales, los lahares, responsables, entre otras, de la destrucción de la ciudad de Armero (veinte mil muertos).

Como se ve, las crecidas de los glaciares, que pueden ser catastróficas, como recientemente en Alaska, plantean en todos los casos serios problemas a las poblaciones que viven en sus cercanías. Pues los glaciares, que son a la vez reservas de agua (irrigación, producción de energía) y lugares de esparcimiento (esquí, alpinismo), también son desgraciadamente causa de catástrofes naturales de lo más mortífero que se conoce.

En la mayoría de los casos, la prevención queda limitada a una prevención pasiva, cuando la naturaleza del peligro, su extensión y su aparición pueden establecerse por adelantado. Esto no sólo pone de manifiesto un problema técnico, aunque la ingeniería en este campo haya hecho recientemente importantes progresos, especialmente gracias a las numerosas utilizaciones prácticas de los glaciares (esquí, teleférico, captación de aguas subglaciares...). Todavía falta en muchos casos definir mejor los mecanismos fundamentales que rigen la dinámica de los glaciares, bien por estudios en el laboratorio (mecánica del hielo, modelación numérica) o por estudios *in situ* en la superficie o en el lecho de los glaciares. Se trata de una investigación de larga duración ya que se tiene que disponer de descripciones cuantitativas detalladas de las fluctuaciones (en situación de crecidas y de descensos) durante largos períodos de tiempo. Además, tiene que versar sobre numerosos glaciares, ya que algunos se prestan mejor al estudio de las variaciones de la alimentación, mientras otros presentan variaciones dinámicas más señaladas.

Una ola de hielo que se propaga

Estos fenómenos dinámicos se observan en algunos glaciares alpinos de tamaño suficiente y traducen un desequilibrio en el movimiento del glaciar: es la llamada «onda de crecida». Aparece, por ejemplo, en la *Mer de Glace* (fig. 2), después de una serie de años de alimentación favorable al glaciar en los que las precipitaciones de nieve han sido importantes, y se traduce en la parte alta de la zona o lengua de ablación por una sobreelevación importante de la superfi-

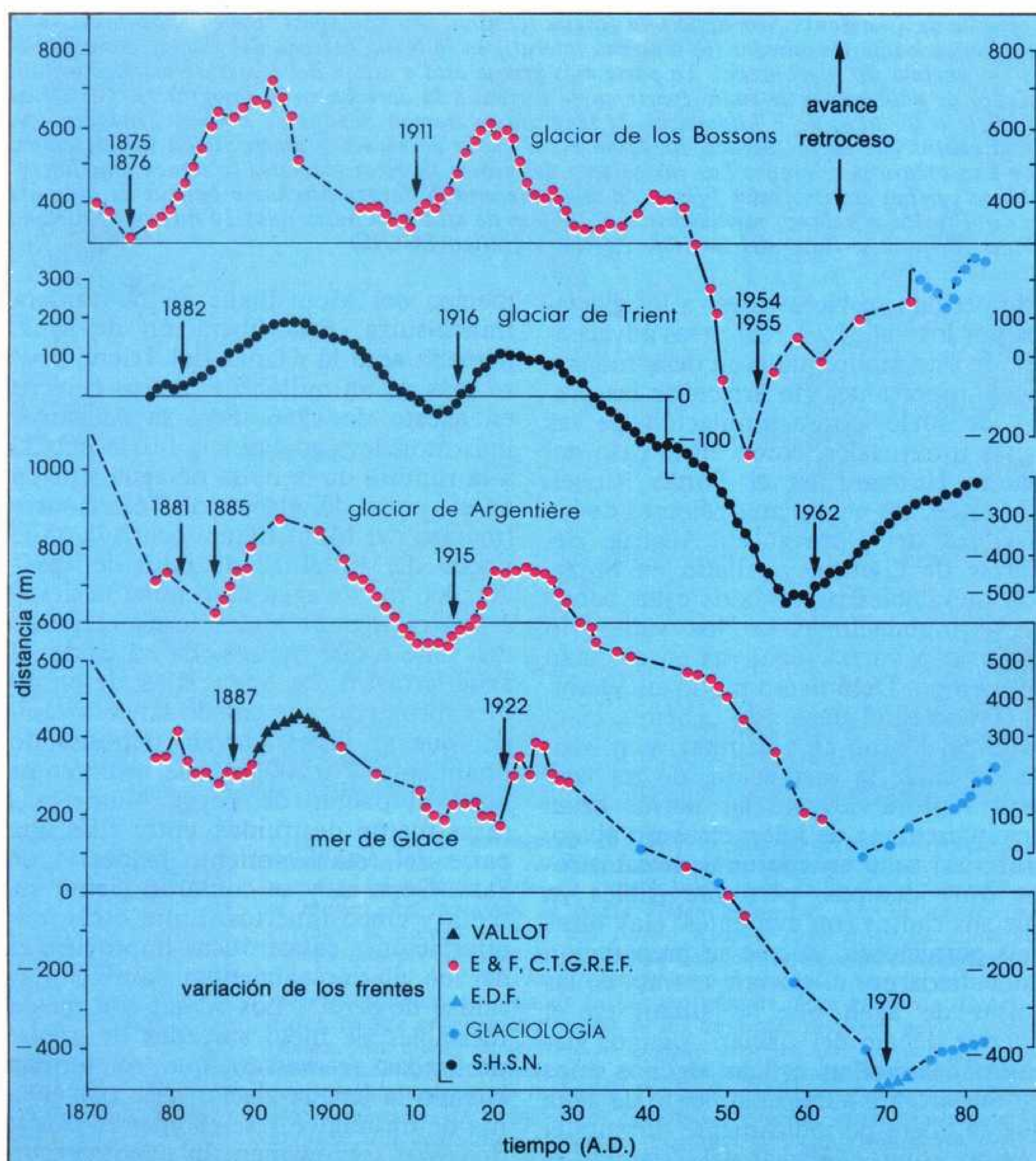


***Figura 3.** En la misma vertiente norte del Mont Blanc, se han seguido regularmente las variaciones de longitud de cuatro glaciares, lo que permite comparar en esta figura sus fluctuaciones durante algo más de un siglo. En el gráfico se han representado las medidas del profesor Vallot entre 1891 y 1899, de* Eaux et Fôrets *(CEMAGREF) entre 1923 y 1956, de la EDF entre 1968 y 1974, del Laboratorio de Glaciología y Geofísica del Medio Ambiente entre 1974 y 1985 y de la Sociedad Helvética de Ciencias Naturales (SHSN) entre 1878 y 1983. A primera vista, los avances y los retrocesos de los diferentes glaciares son aproximadamente sincrónicos; ha habido tres avances: los de 1890, 1920 y el actual, separados por retrocesos, de los que el último, a partir de 1940, ha sido de gran amplitud. No obstante, hay un pequeño desfase temporal entre los diferentes glaciares. Tomando como referencia el momento en que el glaciar empieza a progresar, se advierte que el primer glaciar que reacciona en cada una de las tres situaciones de crecida es el de los Bossons, el más corto; vienen luego Argentière y Trient con cuatro a siete años de retraso; luego hay que esperar entre once y quince años para que reaccione el* Mer de Glace. *Los glaciares traducen por tanto las variaciones climáticas con un retroceso característico de su morfología; se observa, de otra parte, que el más corto, el glaciar de los Bossons es el único que presenta variaciones bruscas muy próximas a las variaciones de la alimentación en nieve, mientras que los más largos han limado esta información y sólo conservan las bajas frecuencias.*

tie. Gracias a los relieves topográficos efectuados en los perfiles transversales fijos se pone de manifiesto la existencia de una ola de hielo en los seis kilómetros de la parte más inferior del glaciar o lengua terminal. Esta ola de hielo se propaga rápidamente con una velocidad del orden de 500 metros por año, mientras que la velocidad media de desplazamiento de conjunto del glaciar sigue próxima a 100 metros por año.

Como en las avenidas, el mecanismo fundamental reponsable de este fenómeno todavía no se ha elucidado del todo, ya que viene determinado por las condiciones en la base del glaciar, en el lecho, rocoso o no. Y sólo se puede acceder allí tras haber perforado de 350 a 400 metros de hielo, cosa que sólo se hace en raras ocasiones como, por ejemplo, para captar aguas. Sin embargo, las características visibles en la superficie de la ola de hielo (especialmente la velocidad de propagación) bastan para prever las variaciones del avance de la lengua terminal y del frente del glaciar. De este modo, una elevación importante de la superficie, observada en 1977, en la parte alta de la lengua de la *Mer de Glace,* hacía prever la llegada, nueve años más tarde, de la ola 4.500 metros más abajo (teniendo en cuenta su velocidad de propagación) en las cercanías de la estación del teleférico de Montenvers. Efectivamente, en el invierno de 1986 se ocasionaron desperfectos en estas instalaciones.

En términos generales, todos los glaciares alpinos de una longitud superior a 3 0 4 kilómetros son afectados por estas olas de hielo llamadas también ondas de crecida. Pero, probablemente las que han afectado al *Mer de Glace* son las que han sido mejor descritas por el glaciólogo S. Martin.[6] Hay que decir que, con variaciones climáticas idénticas, que favorezcan o no la alimentación curso arriba del glaciar, la reacción en términos de avance o de retroceso del frente puede ser muy diferente de un glaciar a otro (fig. 3).

Según la longitud inicial del glaciar, su geometría, y la velocidad habitual del movimiento del hielo, el avance o el retroceso del glaciar pueden ser más o menos importantes, iniciándose con un retraso respecto a las variaciones climáticas más o menos largo (de algunos años a veinte años). Además, las variaciones de longitud de los glaciares pueden ser más o menos sensibles a muy pequeñas fluctuaciones climáticas (los glaciares más largos por ejemplo tienen tendencia a borrar las variaciones climáticas más pequeñas).

Por esta razón, el estudio de las variaciones climáticas a partir tan sólo de las fluctuaciones de longitud de los glaciares no dará resultados antes de mucho tiempo, hasta que no se hayan dado los medios para precisar los mecanismos fundamentales que condicionan el deslizamiento, especialmente en la base del glaciar. Actualmente, un esfuerzo especial tendría que permitir próximamente definir la influencia directa del clima en los glaciares: la medida del balance de la masa glaciar a escala anual. Desgraciadamente, estas medidas son más complejas de realizar que la simple medida de las variaciones de longitud y sólo se han iniciado muy recientemente (1948 en el glaciar de Sarennes[7]). Sin embargo, gracias a medidas topográficas antiguas o a reconstrucciones que utilizan registros de temperaturas y de precipitaciones (próximas a los glaciares o incluso bastante alejadas, como la de Lyon Bron), se ha llegado a reconstruir la fluctuación del balance de masa de los glaciares durante algo más de un siglo. Así, la variación anual del balance de masa se revela homogénea en un macizo como los Alpes, aunque los balances de masa individuales de los diferentes glaciares sean muy diferentes, en función principalmente de su tamaño y de su exposición. En este caso, el conocimiento de la señal de entrada del sistema (la fluctuación del balance de masa) y la de la señal de salida (la variación de longitud) permiten en primera aproximación realizar una modelización sencilla. Ésta traduce la relación lineal que existe entre la longitud del glaciar y su alimentación en nieve durante los años precedentes. Estos modelos, aunque rústicos, permiten explicar aproximadamente del 60 al 80 % de la fluctuación de longitud, y su rendimiento es tanto mejor cuanto más sencilla es la geometría del glaciar. En caso contrario, los rozamientos en los bordes en los valles de morfología compleja introducen no-linearidades de las que no da razón el modelo. Este tipo de cálculo ya ha permitido responder de forma muy satisfactoria a algunas demandas apremiantes de los utilizadores de instalaciones situadas al borde de los glaciares (como teleféricos, pasarelas o tomas de agua) debidas a la reactivación reciente del avance de glaciares.

En lo que respecta a los fenómenos de crecidas o de avenidas de algunos glaciares, su previsión sigue siendo delicada, como atestigua el glaciar Hubbard. En el pasado, el fiordo Russel ya había sido cerrado por el glaciar, por ejemplo en el siglo XVIII: el nivel del fiordo estaba entonces treinta metros por encima del nivel del mar. Luego el glaciar retrocedió hasta 1890 y liberó al fiordo. Desde el principio del siglo, el glaciar Hubbard había iniciado un lento avance, y los glaciólogos, suponiendo una velocidad constante del frente, preveían el cierre del fiordo a principios del siglo próximo.[1] La avenida actual, catastrófica en el plano ecológico, ha alterado pues las previsiones, pero acaso revele una ocasión inesperada por los científicos para explicar las razones de semejante riada en algunos glaciares.

Louis Reynaud y Catherine Ritz.

(6) S. Martin, *Zeitschrift Gletscherkunde,* 13, n.º 1-2, 127. 1977.
(7) F. Valla, *La Houille Blanche,* n.º 6-7, 526, 1984.

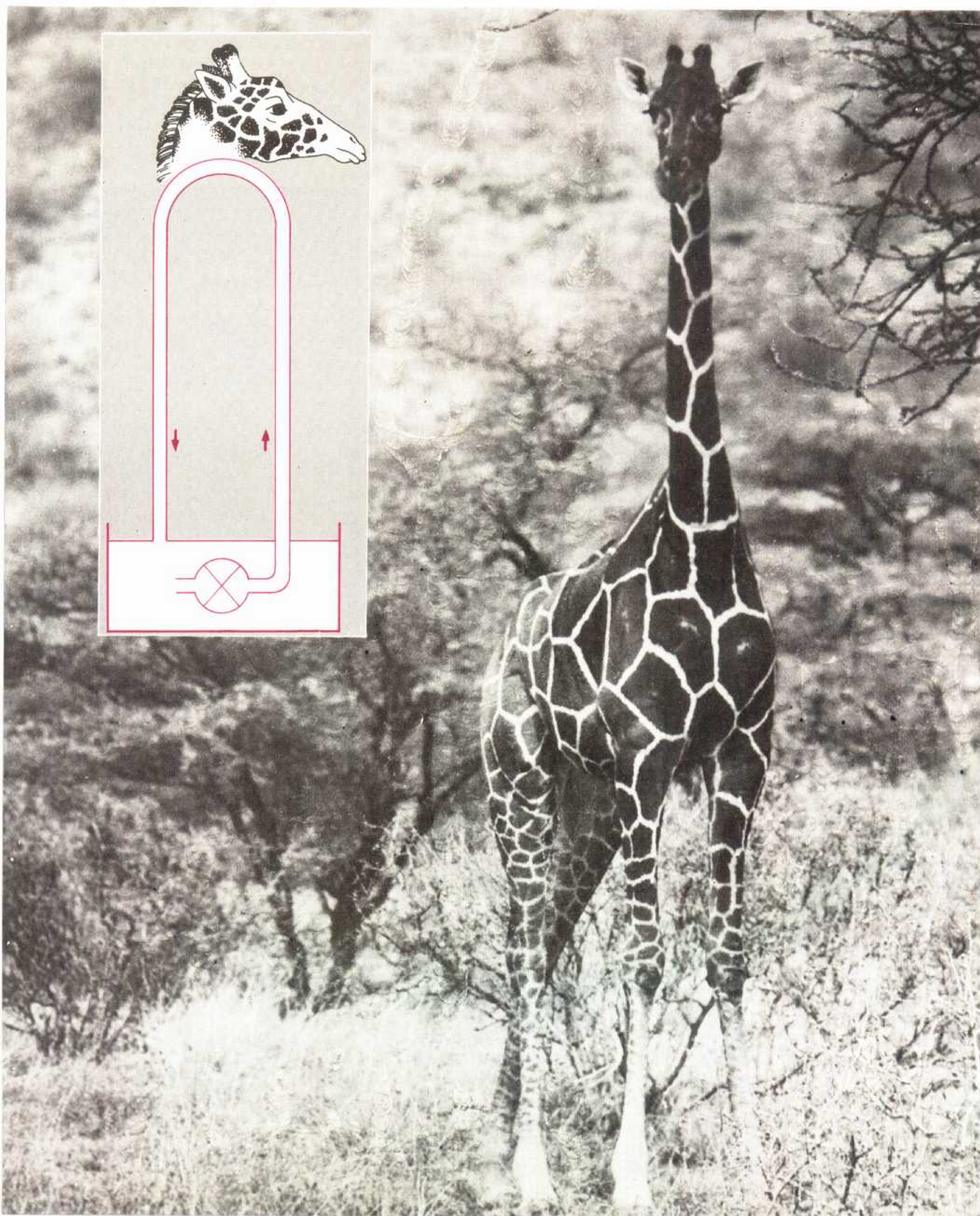
En tierra, en los árboles o en el agua, la serpiente se adapta.

La jirafa y la serpiente: un mismo combate contra la gravedad

La jirafa y la serpiente, animales estéticamente muy diferentes, tienen en común un mismo problema ligado a su peculiar morfología. En efecto, ambos están ridículamente embutidos en un cuerpo muy largo y, con toda lógica, el efecto de la gravedad debería de impedir que al levantar la cabeza la sangre llegara al cerebro. A la inversa, las patas de una y la cola de la otra deberían hincharse por la acumulación del caudal sanguíneo. Felizmente para ellas, no hay nada de eso. El mamífero y el reptil, todo lo poco semejantes que son, se adaptan de forma similar a los inconvenientes de un cuerpo alargado.[1] Dos recientes estudios realizados en Estados Unidos, uno en la serpiente por H.B. Lillywhite, en la universidad de Florida,[2] otro en la jirafa por H.S. Badeer (Creighton university School of Medicine),[3] explican cómo la fisiología de estos animales palía los efectos de la gravedad en la circulación sanguínea.

La jirafa es hipertensa

Una jirafa adulta mide por término medio cinco metros de alto, y su corazón se sitúa a media altura. ¿Cómo salva la sangre los dos metros cincuenta



Una jirafa adulta mide por término medio cinco metros de alto, y su corazón se sitúa a media altura. Para explicar cómo la sangre salva los 2,5 metros se separan el corazón de la cabeza cuando ésta se encuentra levantada, el americano H.S. Badeer aplica el principio del sifón, según el cual, cuando una bomba suministra una cierta energía para hacer subir un líquido en un circuito, debe vencer la resistencia debida a la viscosidad del líquido y a la fuerza de gravitación que se opone a esta subida; si el líquido vuelve a su nivel inicial, la gravedad facilita esta bajada contrapesando así su efecto negativo en la rama ascendente. En este modelo, sólo la viscosidad del líquido ofrece una resistencia al trabajo de la bomba. Acaso sea igual en la jirafa. (Foto A. Kerneis/Jacana.)

que separan el corazón de la cabeza? Según los cálculos de los investigadores interesados por los problemas de la medicina aérea durante la segunda guerra mundial, la fuerza de gravitación que debe vencer el corazón para asegurar la renovación en sangre oxigenada del cerebro cuando el animal tiene la cabeza levantada es comparable a las fuerzas de aceleración soportadas por los pilotos de aviones de gran velocidad.[4] El conocimiento del mecanismo puesto en juego por la jirafa debía, según ellos, ayudar a comprender y evitar los desfallecimientos humanos debidos a una mala irrigación del cerebro. Después de la guerra, algunos equipos de fisiólogos americanos y surafricanos realizaron por primera vez registros de latidos cardíacos y de presiones arteriales en animales cautivos.[5] Algo más tarde, en 1966, el equipo americano de R.L. Van Citters hizo los mismos registros con unas jirafas salvajes en su entorno natural, implantándoles unos aparatos de medición miniaturizados a la altura de la arteria carótida.[6] Los resultados concuerdan: la jirafa es hipertensa. Desde este descubrimiento, los investigadores explican la hipertensión natural del animal por el hecho de que el corazón debe desarrollar una energía suficiente para combatir la fuerza de gravitación y permitir que la sangre llegue al cerebro. De ahí resulta una presión elevada de la sangre en las arterias a la salida del corazón, de donde la hipertensión observada. Sin embargo, H.S. Badeer juzga esta interpretación absolutamente falsa.

El sifonazo

Para H.S. Badeer, la circulación del cuello se realiza en circuito cerrado y funciona a la manera de un sifón. Cuando la jirafa tiene la cabeza alta, el corazón debe oponerse a la presión ejercida por la gravedad sobre el circuito para hacer subir la sangre; luego ésta, tras haber recorrido los vasos del cerebro, desciende de nuevo al corazón, «empujada» por decirlo así por la gravedad. El conjunto del movimiento puede ser comparado al de un líquido en un tubo en forma de U. En este caso, cualquier efecto de la gravedad en un lado del circuito es contrapesado por su efecto en el otro, de suerte que la fuerza de gravitación no influye en el movimiento del líquido en su conjunto: es el principio del sifón[7] (figura). H.S. Badeer aplica este principio a la circulación sanguínea en el cuello de la jirafa, y de ahí deduce que el movimiento de la sangre hacia lo alto no debe verse afectado pues por la fuerza de gravitación.[3]

Si es así ¿por qué es hipertensa la jirafa? Si la presión sanguínea fuera insuficiente en el animal de pie, se produciría, estima H.S. Badeer, un colapso de las paredes de los vasos de la cabeza; la hipertensión es, pues, un medio eficaz para impedirlo. Pero no deja de tener sus riesgos. Así, cuando la jirafa se inclina para beber, la presión sanguínea en la cabeza se eleva bruscamente. La repetición de tales variaciones brutales de presión debería alterar normalmente la elasticidad de las paredes vasculares, incluso romperlas, o acarrear la aparición de edemas, resultado de un derrame de líquido plasmático hacia los tejidos contiguos. Para H.S. Badeer, la existencia de un mecanismo de protección local palía estos inconvenientes. El líquido cefalorraquídeo, en el que se bañan los vasos del cerebro, seguiría en efecto las mismas variaciones de presión que la sangre intravascular; las fuerzas que se ejercen por ambas partes de las paredes serían entonces idénticas, anulando cualquier acción de la presión sobre las paredes.[3] Para ultimar la protección de su sitema circulatorio, la jirafa evita generalmente agachar la cabeza, contentándose con ramonear las hojas de los árboles, y duerme con la cabeza levantada.[4] Cuando debe beber, atenúa la inclinación de su cuello separando los miembros anteriores y minimizando así las variaciones de presión en el cerebro. Por otra parte, su vena yugular está equipada de válvulas que impiden que la sangre que vuelve al corazón sea repelida hacia la cabeza cuando ésta se inclina.

Las patas de la jirafa no se hinchan

Eso en cuanto a la parte alta del cuerpo. Pero ¿cómo evitar la acumulación de sangre en las patas del animal? ¿Cómo resistir a una masa sanguínea semajante? A la elevada presión desarrollada por el corazón se añade la presión debida a la gravitación. Lógicamente, presiones demasiado fuertes a nivel de los miembros inferiores deberían acarrear la ruptura de los vasos, o a lo mejor la aparición de edemas. Ya en 1929, A. Krogh, premio Nobel de Fisiología y de Medicina en 1920 por sus trabajos acerca de los vasos sanguíneos, se asombraba de la ausencia de edemas en las patas de la jirafa. Sospechó una elevada concentración proteica en la sangre, que tendría por efecto aumentar la presión osmótica en el interior de los vasos y evitar el derrame de líquidos plasmáticos hacia el exterior.[8] Pero por falta de jirafa y al no estar a punto en aquel entonces la cuantificación de las proteínas, A. Krogh no pudo verificar su hipótesis, que todavía está por confirmar. Lo que es cierto, en cambio, es que las paredes de los vasos en los miembros inferiores son ricas en fibras musculares y tienen un diámetros reducido. Esta peculiar anatomía, descrita por los surafricanos R.H. Goetz y E.N. Keen en 1957, asegura una eficaz protección de las paredes. A la inversa, los vasos del cuello son más gruesos y sus paredes más finas.[9]

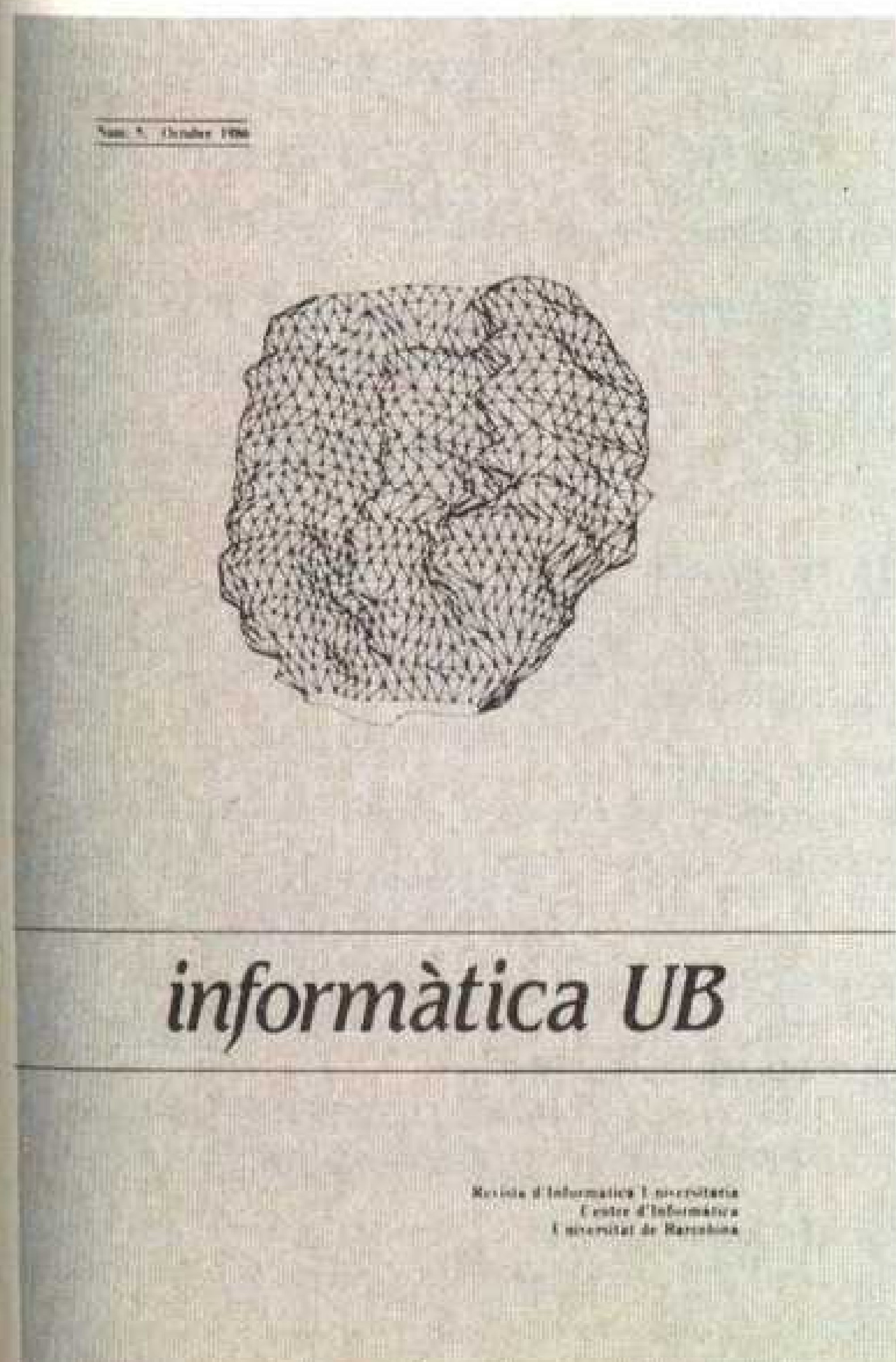
En cierta manera, también las serpientes se encuentran en «desventaja» debido a la longitud de su cuerpo. Cuando levantan la cabeza, el volumen de su cola aumenta en razón del desplazamiento de la sangre hacia atrás, mientras que la presión arterial disminuye en aquélla. H.B. Lillywhite ha medido las variaciones de presión sanguínea en ambas extremidades, en varias especies de serpientes acuáticas, terrestres y arborícolas.[2] Estas variaciones, según comprueba, son independientes de la longitud del animal y se acentúan con el ángulo de inclinación del cuerpo. Sobre todo, H.B. Lillywhite señala unas marcadas diferencias según el modo de vida de los animales, horizontal o vertical. Así, un trepador activo como la serpiente negra de Estados Unidos, *Pituophis melanoleucus*, es menos propensa a los desplazamientos del volumen sanguíneo hacia la cola que la serpiente de cascabel *Crotalus viridis* que permanece en el suelo. Algunas cifras lo demuestran: la presión arterial cae un 25 % cuando la serpiente negra levanta la cabeza, y acusa una baja claramente más importante (69 %) para la serpiente de cascabel; en cuanto al volumen de la cola, aumenta un 1 % en la primera y un 4 % en la segunda. Dato interesante, cuando ambos animales están echados, la presión arterial registrada en la cabeza de la serpiente negra es superior (47 mmHg) a la de la serpiente de cascabel (30 mmHg). En las especies acuáticas, raramente confrontadas al problema de la gravedad, el desplazamiento del volumen sanguíneo hacia la cola es más importante aún que para la especie terrestre. H.B. Lillywhite se decide pues por la existencia de una estrecha correlación entre el modo de vida del animal y la perturbación de su sistema circulatorio por efecto de la gravedad: mientras más sometido está a las fuerzas de gravitación, menos sensible es a ellas. Con toda certeza, la serpiente negra arborícola, que acusa variaciones de presiones sanguíneas en el cuerpo muy inferiores a las de una serpiente terrestre o acuática, se adaptó para no ser entorpecida por la acción nefasta de la gravedad. Como la jirafa, es hipertensa. Su delgadísimo cuerpo y su piel dura recuerdan, según H.B. Lillywhite, la fina estructura de los miembros inferiores de la jirafa. Como ella, tendría unos vasos sanguíneos de pared gruesa y de pequeño calibre para oponerse a las presiones demasiado elevadas en la cola y evitar la aparición de edemas a este nivel. Sin duda serán necesarios otros estudios para comprender mejor los mecanismos de adaptación desarrollados por la jirafa y la serpiente en una misma lucha contra la gravedad. Podemos esperar que aportarán algunas precisiones nuevas e interesantes acerca de la fisiología cardiovascular de los vertebrados en general.

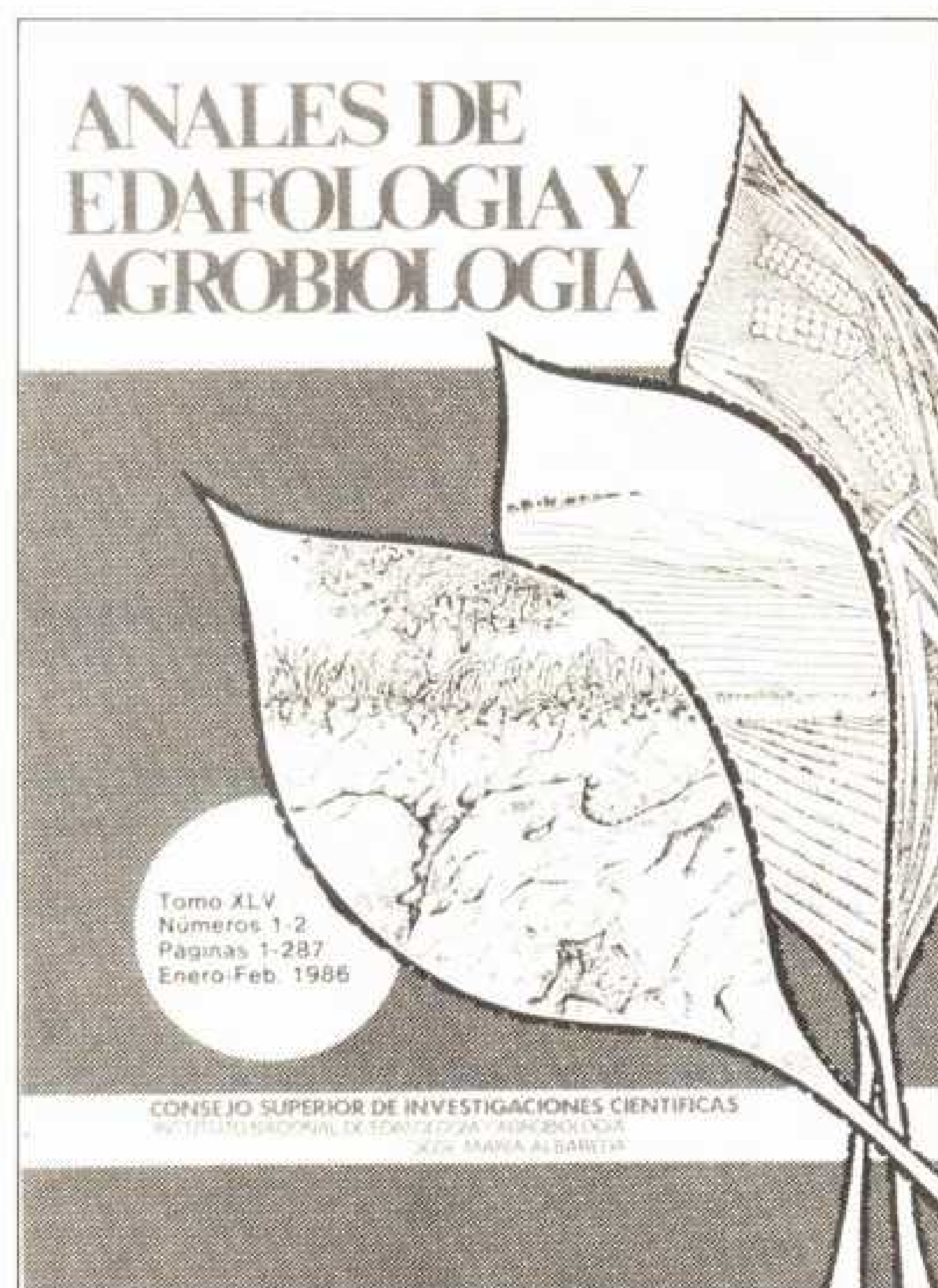
Sylvie Daufresne.

(1) *New scientist*, 20 marzo 1986.
(2) H.B. Lillywhite, *Physiol. Zool.*, *58*, 759, 1985; *American Zoologist*, en prensa.
(3) H.S. Badeer, *Comp. Biochem. Physiol.*, *83 A*, 207, 1986.
(4) J.V. Warren, *Scient. Amer.*, *231*, 96, 1974.
(5) R.H. Goetz *et al.*, *S. Afr. Med. J.*, *29*, 773, 1955; R.H. Goetz *et al.*, *Circul. Res.*, *8*, 1049, 1960.
(6) R.L. Van Citters, *Science*, *152*, 384, 1966.
(7) H.S. Badeer, *The Physiologist*, 28, 41, 1985.
(8) A. Krogh, The Silliman lecture at Yale University, 1929.
(9) R.H. Goetz, E.N. Keen, *Angiology*, *8*, 542, 1957.

PUBLICACIONES RECIBIDAS

- ***Chip,*** n.° 65, revista de informática, Ediciones Arcadia, Madrid, enero, 1987.
- ***A-SOFT ECOS*** n.° 1, edita la Asociación Española de Empresas de Software, Sant Cugat del Vallès.
- ***FRAMEWORK, Técnicas avanzadas y programación en FRED,*** Alan Simpson, Ediciones Anaya Multimedia, Madrid, 1986.
- ***Programación Pascal Turbo Pascal,*** Rodnay Zaks, Ediciones Anaya Multimedia, Madrid, 1986.
- ***Biblioteca de Macros para Lotus 1-2-3,*** David Paul Ewing, Ediciones Anaya Multimedia, Madrid, 1986.
- ***Symphony. Trucos y recursos,*** Duane L. Feldman, Ediciones Anaya Multimedia, Madrid, 1986.
- ***Viaje al interior,*** Margarita Merino, Premio «Antonio González de Lama», Ayuntamiento de León.
- ***TELOS,*** n.° 8, Cuadernos de Comunicación, Tecnología y Sociedad, Fundesco, Madrid.
- ***Difusión Sport Wear,*** Difusión Ediciones, Barcelona.
- ***Anthropos,*** n.° 66-67, revista de documentación científica de la cultura, Editorial del Hombre, Barcelona, 1986.
- ***Dynamis,*** Acta Hispanica ad Medicine Scientiarumque Historiam Illustrandam, vol. 4, Edita Universidad de Granada.
- ***Sólidos inorgánicos,*** D. M. Adams, Editorial Alhambra, Madrid, 1986.
- ***Realidad y fantasía en el mundo criminal,*** Julio Caro Baroja, Edita el Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, 1986.
- ***Anales de Edafología y Agrobiología,*** tomo XLIV, nos. 11-12. Edita el Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, 1986.
- ***CQ Radio Amateur,*** n.° 33, edición española de Boixareu. Editores, Barcelona.
- ***Fundesco,*** n.° 63. Boletín de la Fundación para el Desarrollo de la Función Social de las Comunicaciones, Madrid, noviembre, 1986.
- ***PRODUCTRÓNICA,*** n.° 4, información mensual de nuevos productos y tecnologías, Edita Boixareu Editores, Barcelona, enero, 1987.
- ***AMSTRAD,*** n.° 66, revista independiente para usuarios de ordenadores AMSTRAD.





- ***Theknos,*** n.° 92, Publicació de l'Associació d'Enginyers Tècnics Industrials de Catalunya, Barcelona.
- ***Micros,*** n.° 36, revista de microinformática, Ediciones Arcadia, Madrid, enero, 1987.
- ***Endeavour,*** n.° 4, A review of the Progress of Science and Technology in the Service of Mankind, Pergamon Press, Oxford.
- ***punto y coma,*** n.° 4, expresión de ideas actuales sobre literatura, ciencias, arte e imágenes, Madrid, 1986.
- ***Treballs del Museu de Zoologia,*** n.° 3, Edita el Ayuntamiento de Barcelona, Barcelona.
- ***Butlletí de la Societat catalana de lepidopterologia,*** n.° 51, Edita la Sociedad catalana de lepidopterología, Barcelona, 1986.
- ***IV Trobada sobre la recerca experimental en física y química aplicada a l'estudi i protecció del medi,*** Edita la Sociedad catalana de ciencias físicas, químicas y matemáticas, Barcelona.
- ***Banderas en el cubo de Rubik,*** J. Ruiz Santaella. Publicado en el Boletín de la Real Academia de Córdoba, de Ciencias, Bellas Artes y Nobles Letras, n.° 110, Córdoba, España.
- ***Albert Einstein, filósofo de la paz,*** Francisco Fernández Buey, Edita al Centro de Información y Documentación para el estudio de los problemas de la paz y el desarme de Valladolid, Valladolid.
- ***Conocer,*** n.° 48, la vida y el Universo, Ediciones Tiempo, Madrid, enero, 1987.
- ***El medi atmosfèric,*** comarcas de Barcelona, Diputació de Barcelona.
- ***Llibreria,*** n.° 115, Edita el Gremi de Llibreters de Barcelona i Catalunya, Barcelona.
- ***Investigación y ciencia,*** n.° 124, Prensa Científica, Barcelona, enero, 1987.
- ***El Sol,*** Iain Nicolson, Biblioteca de atlas astronómicos para observadores profesionales y aficionados, Hermann Blume, Madrid, 1986.
- ***La Luna,*** Patrick Moore, Biblioteca de atlas astronómicos para observadores profesionales y aficionados, Hermann Blume, Madrid, 1986.
- ***Electrónica hoy,*** n.° 23, actualidad y tecnología del sector electrónico, Ediciones Arcadia, Madrid, diciembre, 1986.

MANIFESTACIONES CIENTÍFICAS

Para una información adicional

MUNDO CIENTÍFICO

ICYT (CSIC)

● El Instituto de Información y Documentación en Ciencia y Tecnología (ICYT) del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y Mundo Científico ofrecen a los lectores interesados información bibliográfica complementaria de determinados artículos publicados en este número de Mundo Científico.

● Estas bibliografías se obtienen mediante la exploración de las bases de datos bibliográficas adecuadas, accesibles desde el ICYT, y se encuentran a disposición del interesado en el ICYT al precio de 2.000,– Pts.

Descuento del 50 % a los suscriptores de Mundo Científico (1.000 Pts.).

CUPÓN DE PEDIDO

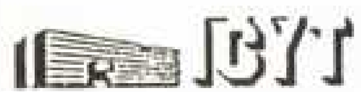
☐ *El desarrollo del cerebro* . 2.000 pts.
☐ *El láser de rayos X* ..... 2.000 pts.

Marque con una X los temas de las bibliografías que le interesen

Nombre ....
Dirección Postal ....
C. P. .... Municipio ....
Provincia ....
Número de suscriptor a Mundo Científico ....

Copie o recorte este cupón y envíelo acompañado de talón bancario, nominal al ICYT, o de giro postal por valor de las bibliografías solicitadas.

ICYT – Consultas Bibliográficas
C/ Joaquín Costa, 22
28002 Madrid
Télex: 22628 CIDMD/E
Teléfono: (91) 261 48 08



4-11 MARZO — HANNOVER (ALEMANIA)
CEBIT'87. Salón mundial de la burótica, de la informática y de las telecomunicaciones.
Deutsch Messe und Ausstellungs AB, Messegelände, D-3000 Hannover 82, RFA.

6-8 MARZO — CAMBRAI (FRANCIA)
4.º seminario de óptica fisiológica.
X. Boquet, U279 INSERM, 13-17 rue Camille Guérin, 59800 Lille, Francia.

16-18 MARZO 1987 — BARCELONA (ESPAÑA)
I Congreso de la Federación Iberoamericana de Biología celular y molecular
Palacio de Congresos Dpto. de Convenciones y Congresos, Avda. Reina M.ª Cristina, s/n 08004 Barcelona

23-27 MARZO 1987 — MADRID (ESPAÑA)
I Curso sobre seguridad minera: explosiones de gases y polvos combustibles.
Fundación Gómez-Pardo, Departamento de formación permanente, Alenza, 1, 28003 Madrid.

25-26 MARZO — PARÍS (FRANCIA)
AIAC: jornadas de estudios. Corrosión y preservación de los materiales en la construcción y en la ingeniería civil.
M. Alphandary, AIAC, 95 rue de Passy, 75016 París, Francia.

26-28 MARZO — CLERMONT-FERRAND (FRANCIA)
Coloquio: la psicología científica y sus aplicaciones.
P. Chambres, Laboratoire de Psychologie sociale, 34 avenue Carnot, 63000 Clermont-Ferrand, Francia.

30 MARZO-1 ABRIL — ESTRASBURGO (FRANCIA)
1.er simposio China-Europa. Investigación terapéutica y envite económico: el mundo del mañana.
G. Gilkes-Dumas, CRIS, 5 rue Marbeuf, 75008 París, Francia.

30 MARZO-3 ABRIL — THIAIS (FRANCIA)
Método de estudio de los conductores y de los semiconductores.
CNRS formation, 27 rue Paul Bert, 94204 Ivry sur Seine Cedex, Francia.

31 MARZO-6 ABRIL — BARCELONA (ESPAÑA)
CONSTRUMAT 87.
Feria de Barcelona, avda. Reina María Cristina, 08004 Barcelona.

1-10 ABRIL — AUSSOIS (FRANCIA)
Coloquio internacional del CNRS: mecanismo y mecánica de la plasticidad.
MF. Lamalle, L.P.M. CNRS-Bellevue, 92195 Meudon Cedex, Francia.

22-24 ABRIL — PALMA DE MALLORCA (ESPAÑA)
XXII Reunión nacional SEMIUC.
INTER-CONGRES, Gran Vía de las Cortes Catalanas, 646, 08007 Barcelona.

18 MAYO-17 JUNIO — BEG-ROHU (FRANCIA)
Escuela de física de la materia condensada: vidrios de espín, redes de neutrones y optimización.
C. Godrèche, Service de physique du solide et de résonances magnétique, CEN Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex, Francia.

En el número anterior *Mundo Científico* 66, página 228, por error se omitieron los artículos seleccionados para la petición de información bibliográfica complementaria del ICYT (CSIC) que eran: La ciencia del Champaña; Cuvier y Lamarck: la querella del catastrofismo; Los asteroides.

25-27 MAYO — CAP D'AGDE (FRANCIA)
Desarrollo del tejido muscular: diferenciación y determinismo: 13.ª reunión del grupo de desarrollo INRA-producciones animales.
M. Ferrara, INRA Theix, 63122 Ceyrat, Francia.

25-27 MAYO — BURDEOS (FRANCIA)
Jornadas de calorimetría y de análisis térmico: los materiales.
Y. Grillet, CTM – CNRS, 26 rue du 141.e RIA, 13003 Marseille, Francia.

16-18 JUNIO — ATENAS (GRECIA)
Mesa redonda internacional: el hábitat egeo prehistórico.
P. Darcque, UA n.º 1 «Protohistoire égéenne», Institut d'art et d'archéologie, 3 rue Michelet, 75006 Paris, Francia.

18-19 JUNIO — TOULOUSE (FRANCIA)
Primer fórum de los jóvenes investigadores en fisiología vegetal.
Cl. Grand, C.P.V. Université P. Sabatier, 118 route de Narbonne, 31062 Toulouse Cedex, Francia.

18-19 JUNIO — MARSELLA (FRANCIA)
ORIA 87: la inteligencia artificial y el mar.
V. Bernadac, IIRIAM, 2 rue H. Barbusse, 13241 Marseille Cedex, Francia.

21-26 JUNIO — VERSALLES (FRANCIA)
IX simposio internacional gnotobiología.
Institut Gustave Roussy, Pavillon de recherche, 94805 Villejuif Cedex, Francia.

23-25 JUNIO — LIMOGES (FRANCIA)
4.º coloquio y exposición sobre la compatibilidad electromagnética.
O. Dafif, IRCOM, Faculté des sciences, 123 avenue A. Thomas, 87060 Limoges Cedex, Francia.

29 JUNIO-31 JULIO — LES HOUCHES (FRANCIA)
Sesión XLVIII: dinámica de los fluidos en astrofísica;

MUNDO CIENTIFICO

LA RECHERCHE, *versión en castellano*

Summary n.º 67

MUNDO CIENTIFICO
DE EDITORIAL FONTALBA

● **DIRECTOR**
José Gili Casals

● **DIRECTOR CIENTÍFICO**
Jaume Josa i Llorca

● **REDACCIÓN**
Carlos Sánchez-Rodrigo
Maria Torres
Ofelia Favaron

● **PRODUCCIÓN**
Ismael Rodríguez

LA RECHERCHE

● **COMITÉ CIENTÍFICO**
Pierre Gilles de Gennes
Xavier Le Pichon
Maurice Lévy
François Morel
Guy Ourisson
Charles Thibault

● **DIRECTOR**
Claude Cherki

ASESORAMIENTO Y TRADUCCIÓN:

El comportamiento de vigilancia en los animales: *Jaume Serrasolsas;* El láser de rayos X; ¿Llevan las matemáticas a Dios?: *Joan Pericay;* El desarrollo del cerebro; Una nueva clase de agentes biológicos: Los ARN anti-mensajeros; La jirafa y la serpiente: un mismo combate contra la gravedad: *Bernat Pardo Alzina;* Los transistores de base metálica: El análisis automático de la escritura; Aviones: ¿retorno de la hélice?: *Teresa Mestre;* La genética al servicio de los carnés de identidad: *Laura Gavaldà;* El origen de la Luna; Una Galaxia en los confines del Universo; La espectacular avenida del glaciar Hubbard: *Amadeu Montoto;* Una nueva hormona del cerebro: *Anna Angel;* Noticias de informática: *Manuel López Naval.*

Con la colaboración de la CAICYT

EDITA
EDITORIAL FONTALBA, S.A.
Valencia, 359 - 6.ª planta
08009 Barcelona (España)
Tels. (93) 258 55 07/08
Télex 97835 FONE

PUBLICIDAD

Directora de publicidad:
Charo de la Torre
Avda. de Bruselas, 74, 1.º, der.
28028 MADRID
Tel. (91) 255 96 13
Delegación Cataluña
Nela Viedma Díaz
Valencia 359, 6.º 1.ª 08009 Barcelona
Tels. (93) 258 50 22 y 258 55 07

Control OJD **de difusión**

Distribución: **Marco Ibérica, S.A.**
Fotocomposición: Catalana de Fotocomposición, S.A.: Consejo de Ciento, 500 - Barcelona. Impresión: Litografía Rosés, S.A. Cobalto, 9 - 08004 Barcelona
B. 10.986-1981

Precio del ejemplar para Canarias, Ceuta y Melilla 380 Ptas.